

**ALGORITMO DE COOPERACIÓN PARA PROTOTIPOS DE ROBOTS  
ACUÁTICOS NO SUMERGIBLES PARA LA RECOLECCIÓN DE OBJETOS  
FLOTANTES**

WILLIAM OSWALDO ÁVILA PARRADO  
CESAR ANDRÉS SANTOS NOVOA

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BOGOTÁ D.C.  
NOVIEMBRE DE 2015**

**ALGORITMO DE COOPERACIÓN PARA PROTOTIPOS DE ROBOTS  
ACUÁTICOS NO SUMERGIBLES PARA LA RECOLECCIÓN DE OBJETOS  
FLOTANTES**

**WILLIAM OSWALDO ÁVILA PARRADO  
CESAR ANDRÉS SANTOS NOVOA**

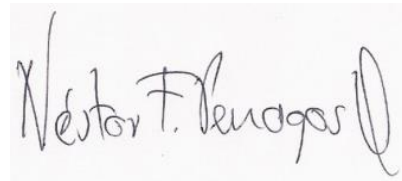
**MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO MECATRÓNICO**

**DIRECTOR:  
NÉSTOR FERNANDO PENAGOS**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BOGOTÁ D.C.  
NOVIEMBRE DE 2015**

Nota de aceptación:

El trabajo de grado, titulado  
**“ALGORITMO DE  
COOPERACIÓN PARA  
PROTOTIPOS DE ROBOTS  
ACUÁTICOS NO  
SUMERGIBLES PARA LA  
RECOLECCIÓN DE  
OBJETOS FLOTANTES”**  
elaborado y presentado por  
los estudiantes William Avila y  
Cesar Santos, como requisito  
parcial para optar al título de  
Ingeniero Mecatrónico,  
cumple el objetivo general y  
los específicos.



---

Firma del Director de Proyecto

Bogotá D.C. 27 de Noviembre de 2015

## **DEDICATORIA**

Dedicamos este trabajo de grado a nuestros padres, quienes nos han dado el apoyo moral, espiritual y económico para culminar este proyecto.

Al director de Tesis Ingeniero Néstor Penagos, por siempre contribuir con conocimiento, ideas para la realización y terminación del presente trabajo.

A todos los que nos apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se la debemos por su apoyo incondicional.



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos principalmente a nuestra familia, especialmente a nuestros padres quienes fueron el apoyo constante durante la carrera para lograr el objetivo trazado para un futuro mejor y ser orgullo para ellos y de la familia.

A la Universidad Piloto de Colombia, alma mater de la innovación ya que nos está formando para el futuro como Ingenieros Mecatrónicos.

De igual manera a nuestros formadores en especial al docente Ingeniero Néstor Penagos por su apoyo en este trabajo de grado; Al Ingeniero Luis Carlos Meneses por los consejos y observaciones al mismo.

## **RESUMEN**

Este trabajo de grado tiene como objetivo principal desarrollar un algoritmo de cooperación para la interacción entre robots que permita recolectar objetos flotantes en una superficie de agua, como en lagos, embalses, estanques, etc. con el fin de proveer una solución práctica a la descontaminación de fuentes hídricas y una base de estudio y desarrollo a futuros proyectos relacionados con la robótica cooperativa.

Se presenta la descripción de otros navíos utilizados en proyectos de cooperativismo y se evalúa su desempeño para tenerse en cuenta en el prototipo a realizar. Una vez escogido el tipo de embarcación, empieza la búsqueda en el mercado para la adquisición.

Los componentes electrónicos necesarios para lograr el cooperativismo entre los individuos son descritos y analizados para seleccionar los apropiados. Se debe tener claro que el trabajo cooperativo demanda el uso de algunos elementos como por ejemplo módulos de comunicación inalámbrica, los cuales permiten la transmisión y recepción de información entre robots, con el fin de tener conocimiento de las acciones ejecutadas por cada uno.

Por último, teniendo los circuitos electrónicos y estructura mecánica, se arman los prototipos para realizar pruebas en campo y verificar el funcionamiento y rendimiento de los robots acuáticos. Además se evalúa el desempeño del algoritmo desarrollado para recolectar los objetos flotantes de forma conjunta, con el fin de facilitar proyectos futuros en robótica cooperativa, pues dos robots pueden ser más eficientes que uno.

## **ABSTRACT**

The main goal of this thesis is the development of a cooperative algorithm to the interaction between robots to gather floating objects on a water surface as a lakes, ponds, dams, etc. with the purpose to decontaminate water sources and to be the base to the future works or investigations related with cooperative robotic.

The description of other ships used in cooperativism projects is presented and the performance was evaluated for take into account to the prototype which is going to do. Once the ship prototype is selected begins the search to get it.

The electronic components needed to achieve the cooperativism between the robots are described and analyzed to select the appropriate. The cooperative work requires some elements like wireless communication modules, which allows the information transmission and reception between robots to keep informed of the actions that each robot doing.

At last, with the electronic circuits and the mechanic structure, the prototype is built to make field tests and evaluate the performance of the robots. Also, the developed algorithm is evaluated to collect the floating objects in cooperative way to ease future projects in cooperative robotic to simplify many process, because two robots are more efficient than one.

## CONTENIDO

pág.

<b>1. CAPÍTULO. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
<b>1.4 JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>1.5 ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>3</b>
<b>1.6 OBJETIVOS .....</b>	<b>6</b>
<b>1.6.1Objetivo general .....</b>	<b>6</b>
<b>1.6.2Objetivos específicos .....</b>	<b>6</b>
<b>1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES .....</b>	<b>7</b>
<b>1.8 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DEL PROGRAMA .....</b>	<b>8</b>
<b>1.9 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
<b>1.9.1Cooperación .....</b>	<b>8</b>
<b>1.9.2Cooperación en la naturaleza.....</b>	<b>9</b>
<b>1.9.2.1 Comportamiento eusocial .....</b>	<b>9</b>
<b>1.9.2.2 Comportamiento cooperativo .....</b>	<b>9</b>
<b>1.9.3Cooperación en robótica .....</b>	<b>10</b>
<b>1.9.4Generación del cooperativismo .....</b>	<b>11</b>
<b>1.9.4.1 Arquitectura del grupo .....</b>	<b>11</b>
<b>1.9.4.1.1 Centralización y descentralización .....</b>	<b>11</b>
<b>1.9.4.1.2 Grupo homogéneo y heterogéneo .....</b>	<b>12</b>
<b>1.9.4.1.3 Estructura de comunicación .....</b>	<b>13</b>
<b>1.9.4.1.4 Modelado de otros individuos.....</b>	<b>14</b>
<b>1.9.4.2 Conflicto de recursos .....</b>	<b>14</b>
<b>1.9.4.3 Orígenes de cooperación .....</b>	<b>15</b>
<b>1.9.4.4 Capacidad de aprendizaje .....</b>	<b>15</b>

1.9.4.5	Problemas geométricos.....	15
1.9.4.5.1	Planificación de trayectorias.....	16
1.9.4.5.2	Problemas de formación y marcha.....	16
1.9.5	Robótica móvil cooperativa.....	16
1.9.6	Vehículos acuáticos.....	17
1.9.7	Componentes electrónicos.....	18
1.9.7.1	Tarjetas electrónicas de desarrollo.....	18
1.9.7.2	Tarjetas electrónicas de potencia.....	25
1.9.7.3	Módulos de comunicación.....	28
1.9.7.4	Módulos de posicionamiento.....	29
1.9.7.5	Sensores.....	29
2.	CAPITULO. ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO.....	32
2.1	INTRODUCCIÓN.....	32
2.2	ASC ARTEMIS.....	32
2.3	SCOUT.....	33
2.4	ACES.....	34
2.5	INTEGRACIÓN DEL ESTUDIO PREVIO.....	35
2.6	ESTUDIO DE FLOTABILIDAD.....	39
2.7	ESTRUCTURA PARA LA RECOLECCIÓN DE OBJETOS.....	43
2.7.1	Descripción.....	44
2.7.2	Construcción.....	46
2.7.3	Análisis de la estructura.....	49
2.7.4	Resultado del estudio.....	52
3.	CAPITULO. METODOLOGIA DE COOPERACION.....	55
3.1	INTRODUCCION.....	55
3.2	METODOLOGÍA DE COOPERACIÓN EN LA NATURALEZA.....	55
3.2.1	Selección grupo heterogéneo o homogéneo.....	55
3.2.2	Selección de la metodología de cooperación.....	59
3.3	CARACTERISTICAS DE LOS ROBOTS.....	60
3.4	TAREA Y SUBTAREAS.....	62

3.5.1Subtarea de búsqueda.....	63
3.5.2Subtarea de petición de ayuda.....	63
3.5.3Subtarea de transporte.....	65
3.5 DISEÑO DE SOFTWARE.....	67
3.6.1Diagrama general.....	67
3.6.2Funciones.....	68
3.6.3Programa principal.....	76
3.6.4Ciclo repetitivo.....	78
3.6.4.1 Caso 1.....	79
3.6.4.2 Caso 2.....	79
3.6.4.3 Caso 3.....	82
3.6.4.4 Caso 4.....	97
4. CAPITULO. DISEÑO DE HARDWARE Y SOFTWARE.....	101
4.1 TARJETA DE DESARROLLO.....	101
4.1.1Software de programación.....	103
4.2 SENSORES.....	107
4.2.1Sensor de proximidad.....	107
4.2.2Sensor de contacto.....	109
4.2.3Sensor de localización.....	110
4.2.3.1 Módulo GPS.....	111
4.2.3.1.1 Protocolo NMEA 0183.....	113
4.2.3.2 Brújula magnética.....	118
4.2.3.2.1 Registros.....	121
4.2.4Configuración de sensores.....	132
4.2.4.1 Configuración del módulo GPS.....	132
4.2.4.2 Configuración de la brújula magnética.....	142
4.3 MODULO DE COMUNICACION INALAMBRICO.....	145
4.3.1Configuración módulo de comunicación.....	149
4.4 ACTUADORES.....	159
4.4.1Modulación por ancho de pulso.....	159

4.4.2Motor brushless .....	160
4.4.2.1 Configuración del ESC .....	163
4.4.3Servomotor .....	167
4.5 BATERIAS.....	169
4.6 DISEÑO DE HARDWARE .....	171
4.6.1Circuitos de control y sensores .....	172
4.6.2Circuitos de potencia y actuadores eléctricos.....	176
5. CAPITULO. INTEGRACION DE LOS CIRCUITOS ELECTRONICOS .....	178
6. CAPITULO. ANALISIS DE PRUEBAS Y RESULTADOS .....	189
6.1 PRUEBAS .....	189
6.1 RESULTADOS .....	195
7. CAPITULO. CONCLUSIONES .....	196
BIBLIOGRAFÍA .....	197
ANEXOS .....	203

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Comparativo de estructuras utilizadas. ....	39
Tabla 2. Masa de los componentes del robot. ....	42
Tabla 3. Características de la estructura. ....	53
Tabla 4. Propiedades del material. ....	53
Tabla 5. Tensión generada. ....	54
Tabla 6. Desplazamiento generado. ....	54
Tabla 7. Factor de seguridad. ....	54
Tabla 8. Funciones del algoritmo. ....	69
Tabla 9. Datos del ejemplo de aplicación. ....	83
Tabla 10. Tabla comparativa de algunas tarjetas de desarrollo. ....	101
Tabla 11. Limitaciones versión de prueba compilador MDK-ARM. ....	104
Tabla 12. Tabla comparativa compiladores. ....	105
Tabla 13. Características de los sensores de proximidad (Óptico y ultrasónico). ....	108
Tabla 14. Características módulo GPS. ....	113
Tabla 15. Mensajes de salida. ....	114
Tabla 16. Características brújula digital. ....	121
Tabla 17. Registros de memoria HMC5883L. ....	121
Tabla 18. Configuration register A. ....	122
Tabla 19. Descripción de los bits. ....	123



Tabla 20. Salida en modo de medición continua. ....	123
Tabla 21. Modos de medición. ....	124
Tabla 22. Configuration Register B. ....	125
Tabla 23. Descripción de los bits. ....	125
Tabla 24. Valores nominales de ganancia. ....	125
Tabla 25. Mode Register. ....	126
Tabla 26. Descripción de los bits. ....	126
Tabla 27. Modos de operación. ....	127
Tabla 28. Ubicación y valor de los bits. ....	128
Tabla 29. Ubicación y valor de bits. ....	128
Tabla 30. Ubicación y valor de bits. ....	129
Tabla 31. Status Register. ....	129
Tabla 32. Descripción de los bits. ....	130
Tabla 33. Identification Register A. ....	131
Tabla 34. Identification Register B. ....	131
Tabla 35. Identification Register C. ....	131
Tabla 36. Configuración establecida para el registro Configuration Register A. ...	143
Tabla 37. Configuración establecida para el registro Mode Register. ....	144
Tabla 38. Protocolos de comunicación inalámbrica. ....	145
Tabla 39. Especificaciones de los módulos XBee. ....	148
Tabla 40. Parámetros a configurar. ....	163
Tabla 41. Características de baterías comerciales. ....	170
Tabla 42. Características de los elementos seleccionados. ....	170

Tabla 43. Conexión de los circuitos de control y sensores. ....	175
Tabla 44. Conexión de los circuitos de control y sensores. ....	177
Tabla 45. Coordenadas geográficas del área de las pruebas.....	190

## LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Grey Walter en el trabajo. ....	4
Figura 2. Cooperación en el campo de la robótica.....	10
Figura 3. Ejemplos de barco, buque y bote. ....	18
Figura 4. Tarjetas electrónicas de desarrollo comerciales. ....	19
Figura 5. Ejemplos de tarjetas de desarrollo de Texas Instruments. ....	20
Figura 6. Tarjeta de desarrollo chipKIT uC32. ....	21
Figura 7. TarjetasSTM32F3DISCOVERY y STM32F4DISCOVERY.....	23
Figura 8. Tarjeta de desarrollo FRDM-K64F de Freescale Semiconductor. ....	24
Figura 9. Tarjeta de desarrollo FRDM-KL43Z de Freescale Semiconductor. ....	25
Figura 10. Tarjeta de potencia basada en el circuito integrado L298N.....	26
Figura 11. Tarjeta de potencia A4988.....	27
Figura 12. Tarjeta de potencia Pololu Maestro servo control de 6 canales.....	27
Figura 13. Tarjeta de potencia controladora Hobby King 20A ESC 3A UBEC.....	28
Figura 14. Barco pesquero de arrastre a escala, ASC ARTEMIS.....	33
Figura 15. Diseño Kayak del SCOUT .....	34
Figura 16. Estructura catamarán del robot ACES.....	35
Figura 17.Catamarán simple ASC ARTEMIS.....	36
Figura 18. Hidrodeslizador utilizado por Scerri e hidrodeslizador de pantano. ....	38
Figura 19. Diseño en SolidWorks® del Hidrodeslizador a utilizar. ....	38

Figura 20. Volumen de la base del hidrodreslizador calculado mediante SolidWorks®.....	41
Figura 21. Malla en espacio público.....	43
Figura 22. Pesca de arrastre.....	44
Figura 23. Cotas del sistema de arrastre. ....	45
Figura 24. Columnas de aluminio en perfiles cuadrados. ....	46
Figura 25. Perfil vertical en L de 16 cm.....	46
Figura 26. Estructura en construcción. ....	47
Figura 27. Estructura en construcción, instalando remaches. ....	47
Figura 28. Estructura terminada.....	48
Figura 29. Malla de poliuretano rígido.....	48
Figura 30. Estructura de arrastre. ....	49
Figura 31. Sujeción de la estructura. ....	49
Figura 32. Superficie de la estructura en contacto con el agua. ....	50
Figura 33. Tensión de Von Mises. ....	51
Figura 34. Factor de seguridad máximo y mínimo. ....	52
Figura 35. Metodología de cooperación de jirafas y elefantes.....	57
Figura 36. Metodología de cooperación de delfines. ....	58
Figura 37. Pájaros africanos en posición para alimentarse. ....	60
Figura 38. Componentes de cada robot.....	61
Figura 39. Metodología de Cooperación.....	62
Figura 40. Diagrama de flujo para la subtaska de búsqueda. ....	64
Figura 41. Diagramas de flujo para la subtaska de petición de ayuda. ....	65

Figura 42. Diagrama de flujo para la subtaska de transporte.....	66
Figura 43. Diagrama de flujo general del algoritmo. ....	68
Figura 44. Diagrama de flujo de la funci3n brujula_.....	70
Figura 45. Diagrama de flujo de la funci3n GPS. ....	71
Figura 46. Diagrama flujo de la funci3n detener. ....	72
Figura 47. Se1al PWM del canal 1.....	72
Figura 48.Se1al PWM del canal 2.....	73
Figura 49. Diagrama flujo de la funci3n mover.....	73
Figura 50. Se1al PWM generada por la tarjeta de desarrollo. ....	74
Figura 51. Diagrama flujo del giro a la derecha y a la izquierda. ....	74
Figura 52. Se1al PWM de giro a la derecha. ....	75
Figura 53. Se1al PWM de giro a la izquierda.....	75
Figura 54. Diagrama de flujo de la funci3n sin_giro. ....	76
Figura 55. Diagrama de flujo del programa principal. ....	77
Figura 56. Diagrama de flujo del ciclo repetitivo. ....	78
Figura 57. Diagrama de flujo de la subtaska de b1squeda parte 1. ....	80
Figura 58. Diagrama de flujo de la subtaska de b1squeda parte 2. ....	81
Figura 59.Diagrama de flujo de la subtaska de petici3n de ayuda. ....	81
Figura 60. Ejemplo de aplicaci3n.....	82
Figura 61. Funcionamiento del algoritmo de navegaci3n parte 1.....	84
Figura 62. Funcionamiento del algoritmo de navegaci3n parte 2.....	85
Figura 63. Funcionamiento del algoritmo de navegaci3n parte 3.....	86
Figura 64. Diagrama de la subtaska de desplazamiento a ayudar parte 1.....	86

Figura 65. Diagrama de la subtaska de desplazamiento a ayudar parte 2.....	87
Figura 66. Diagrama de la subtaska de desplazamiento a ayudar parte 3.....	88
Figura 67. Diagrama de la subtaska de desplazamiento a ayudar parte 4.....	89
Figura 68. Diagrama de la subtaska de desplazamiento a ayudar parte 5.....	90
Figura 69. Diagrama de la subtaska de desplazamiento a ayudar parte 6.....	91
Figura 70. Diagrama de la subtaska de desplazamiento a ayudar parte 7.....	92
Figura 71. Diagrama de la subtaska de desplazamiento a ayudar parte 8.....	93
Figura 72. Diagrama de la subtaska de desplazamiento a ayudar parte 9.....	94
Figura 73. Diagrama de la subtaska de desplazamiento a ayudar parte 10.....	95
Figura 74. Diagrama de la subtaska de desplazamiento a ayudar parte 11.....	96
Figura 75. Diagrama de la subtaska de desplazamiento a ayudar parte 12.....	97
Figura 76. Diagrama de flujo de la subtaska de transporte parte 1.....	98
Figura 77. Diagrama de flujo de la subtaska de transporte parte 1.....	99
Figura 78. Funcionamiento del algoritmo de transporte.....	100
Figura 79. Tarjeta de desarrollo.....	103
Figura 80. Interfaz mikroC PRO for ARM.....	106
Figura 81. Sensores de proximidad.....	107
Figura 82. Sensor SHARPGP2Y0D815Z0F.....	109
Figura 83. Sensor digital y análogo.....	110
Figura 84. Módulo GPS.....	111
Figura 85. Sistema GPS.....	112
Figura 86. Módulo GPS con antena cerámica.....	112
Figura 87. Registro CGA.....	115

Figura 88. Registro GLL.....	115
Figura 89. Registro GSA.....	116
Figura 90. Registro GSV.....	116
Figura 91. Registro RMC. ....	117
Figura 92. Registro VTG. ....	117
Figura 93. Brújula magnética análoga y digital. ....	118
Figura 94. Brújula digital GY-273.....	119
Figura 95. Diseño de alimentación y conexión del bus serial I2C.....	120
Figura 96. Sentencias del protocolo NMEA. ....	132
Figura 97. Interfaz del software u-center. ....	133
Figura 98. Ejemplo de coordenadas geográficas.....	134
Figura 99. Tarjeta USB a Serial y Modulo GPS. ....	135
Figura 100. Selección del COM. ....	136
Figura 101. Configuración de la velocidad de transmisión.....	136
Figura 102. Indicador de conexión.....	137
Figura 103.Opción para configuración del Baudrate y puerto de comunicación. .	137
Figura 104. Ruta de acceso a la ventana Text Console y ejemplo. ....	138
Figura 105. Sentencias en protocolo NMEA 0183 transmitidas por el módulo. ...	139
Figura 106. Deshabilitar sentencias.....	140
Figura 107. SentenciaGLL. ....	140
Figura 108. Salvar la configuración en u-center. ....	141
Figura 109.Circuito entre sensor y tarjeta de desarrollo. ....	142

Figura 110. Diagrama de flujo general para la configuración del sensor GY-273. ....	144
Figura 111. Módulos XBee. ....	147
Figura 112. Adaptador USB a XBee más el módulo Xbee y un cable mini USB. ....	149
Figura 113. Programa XCTU. ....	150
Figura 114. Ventana Add radio device. ....	151
Figura 115. Herramienta Discover devices. ....	152
Figura 116. Ventana principal (Radio Modules). ....	153
Figura 117. Ventana principal ( <i>Radio Configuration</i> ). ....	154
Figura 118. Modelo del módulo XBee. ....	155
Figura 119. Opción para seleccionar el firmware del módulo XBee. ....	155
Figura 120. Pasos para cargar el firmware al módulo XBee. ....	156
Figura 121. Configuración de los parámetros del módulo XBee parte 1. ....	157
Figura 122. Configuración de los parámetros del módulo XBee parte 2. ....	158
Figura 123. Ejemplo de señal PWM con ciclo de trabajo variado. ....	160
Figura 124. Motor Brushless. ....	161
Figura 125. ESC con tarjeta programadora. ....	162
Figura 126. Motor Brushless seleccionado. ....	163
Figura 127. Conexión del motor, el ESC y la batería. ....	165
Figura 128. Ejemplo de configuración tarjeta programadora. ....	166
Figura 129. Conexión de la tarjeta programadora al ESC. ....	166
Figura 130. Partes de un servomotor. ....	167
Figura 131. Rotación de un servomotor. ....	168



Figura 132. Grupos de componentes.....	172
Figura 133. Arquitectura de conexión de los circuitos de control y sensores.....	173
Figura 134. Circuito para la regulación de voltaje usando el LM7805.....	174
Figura 135. Diagrama de conexión de los circuitos de control y sensores. ....	175
Figura 136. Arquitectura de conexión de los circuitos de potencia y actuadores.	176
Figura 137. Diagrama de conexión de los circuitos de potencia y actuadores. ...	177
Figura 138. Elementos usados en cada robot.....	178
Figura 139. Instalación del servomotor. ....	179
Figura 140. Conexión del EXC y el motor brushless.....	180
Figura 141. Instalación del motor brushless. ....	180
Figura 142. Instalación de la tarjeta de desarrollo. ....	181
Figura 143. Protoboard con circuito de regulación de voltaje, sensores y XBee.	182
Figura 144. Montaje de la protoboard.....	182
Figura 145. Rejilla de protección del hidrodeshlizador.....	183
Figura 146. Sensores infrarrojos y de contacto sobre el hidrodeshlizador.....	184
Figura 147. Ubicación de la batería sobre la embarcación. ....	184
Figura 148. Orificios para la instalación de la rejilla de arrastre.....	185
Figura 149. Robot terminado. ....	185
Figura 150. Imán cerámico o de ferrita. ....	186
Figura 151. Imán de Neodimio.....	187
Figura 152. Imanes sobre la estructura de recolección. ....	187
Figura 153. Posibles alineaciones de los robots. ....	188
Figura 154. Objetos ubicados aleatoriamente.....	189

Figura 155. Imagen satelital del área usada en las pruebas.....	190
Figura 156. Ángulo de orientación para el área de trabajo. ....	191
Figura 157. Inicio de pruebas.....	191
Figura 158. Robot Ejecutando la subtask de búsqueda. ....	192
Figura 159. Robot desplazándose en el área. ....	192
Figura 160. Robots ejecutando la subtask de búsqueda.....	193
Figura 161. Detección de objeto. ....	193
Figura 162. Unión de los robots para el transporte del objeto. ....	194
Figura 163. Fin de la subtask de transporte y del algoritmo de cooperación. ....	194

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Informe de simulación estructura recolectora.....	203
Anexo B. Hoja de datos tarjeta de desarrollo STM32F4Discovery. ....	208
Anexo C. Hoja de datos brújula digital HMC5883L.....	210
Anexo D. Hoja de datos Xbee Serie 2. ....	230
Anexo E. Hoja de datos regulador de voltaje LM7805.....	232
Anexo F. Manual de usuario ESC 20 A HobbyKing. ....	240
Anexo G. Hoja de datos módulo GPS NEO-6 Series.....	249
Anexo H. Hoja de datos sensor infrarrojo GP2Y0D815Z0F.....	251

# 1. CAPÍTULO. MARCO REFERENCIAL

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El estudio y desarrollo de la robótica cooperativa, la cual tiene bases en el comportamiento colectivo que se presenta en la naturaleza, ha avanzado por diversas razones como: las tareas pueden ser tan complejas para solo un robot, que usar múltiples robots garantiza beneficios de rendimiento al llevarla a cabo; la construcción y uso de múltiples robots puede llegar a ser más económica, fácil de implementar, con mayor flexibilidad y tolerante a fallos que tener un robot poderoso para cada tarea; y el enfoque constructivo e investigativo de la robótica cooperativa puede producir conocimientos sobre problemas fundamentales de las ciencias sociales y ciencias de la vida<sup>1</sup>.

El proyecto abarca como tema de investigación la robótica cooperativa aplicada a la recolección de objetos flotantes en zonas como: lagos, embalses, estanques o incluso en el océano. La robótica cooperativa tiene como objetivo la solución de un problema que es complejo para un solo robot, pero que se puede solucionar con varios robots que se comunican entre ellos. Normalmente cada robot tiene una función específica que en conjunto llega a ser una herramienta para solucionar el problema en poco tiempo.

Debido a que se desea una cooperación autónoma entre los robots acuáticos, se usarán diversas herramientas para la navegación, ubicación, desplazamiento y comunicación. Entre las herramientas que se pueden usar para lograr la cooperación entre los robots se encuentran dispositivos como módulos GPS (sistema de posicionamiento global) o cámaras de visión artificial para la navegación y ubicación de cada uno, los sensores de ultrasonido o infrarrojos para la detección de objetos, el bluetooth, XBee, Wi-Fi o radio frecuencia para la comunicación inalámbrica. Cada herramienta tiene ventajas y desventajas que se estudiarán para la selección e implementación en los prototipos.

---

<sup>1</sup>CAO, Uny; FUKUNAGA, Alex y KAHNG, Andrew. Autonomous Robots. Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. [en línea]. Marzo 1997. Vol. 4 [consultado 4 de Mayo de 2015]. p. 1-23. Disponible en: <<http://metahack.org/cooperative-robots-survey-journal.pdf>>. ISSN 0929-5593.

## **1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Durante décadas los problemas ambientales han estado en los primeros planos de la mayoría de las naciones del mundo. En el país el tema de lagos, lagunas, humedales y ríos se ha dejado un poco de lado hasta que se han visto realmente los problemas (lagunas contaminadas, degradación de humedales, ríos secos o con basura lo cual causa que no se pueda utilizar el agua que por ellos fluye). No hay que olvidar que el agua es un recurso limitado y no renovable, además de ser necesaria para la vida, incide en las actividades socioeconómicas de una comunidad. Todos los estudios coinciden en que la recuperación de este recurso además de tardar mucho tiempo, sería altamente costoso incluso para las naciones más desarrolladas. Un ejemplo de esto es el plan de recuperación del río Bogotá que tiene costos hasta el momento en billones de pesos.

Hay un gran número de contaminantes del agua como los microorganismos patógenos, desechos orgánicos, sustancias químicas, sedimentos o materiales suspendidos<sup>2</sup>, pero debido al crecimiento poblacional en zonas cercanas a sus afluentes el problema se ha radicalizado ya que no sólo son residuos orgánicos, provenientes de cloacas, si no también productos químicos de industrias que no tienen control en sus desperdicios, lo cual afecta no sólo a la flora y fauna del sistema hídrico sino también a los seres humanos que la usan para sus necesidades, a tal punto de ser perjudicial para la salud.

Fundamentalmente, el agua se contamina por culpa de la actividad humana, ya que la población va creciendo cada año, necesitando más agua, más comida, más transporte, más vestimenta, más recursos y más espacio en el que vivir<sup>3</sup>.

## **1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Qué algoritmo es el adecuado para recolectar objetos flotantes que existan en un cuerpo de agua, por medio de robots cooperativos?

---

<sup>2</sup> ECHARRI, Luis. Contaminación del agua. Universidad de Navarra. 2007.

<sup>3</sup>Contaminación de los ríos, [Internet], [Consultado 10 de mayo de 2015] Disponible en: <<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/20358/1/pfc%20Carlos%20Quesada.pdf>>

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

El proyecto se realizará con el fin de presentar un algoritmo adecuado, evaluando y escogiendo el mejor método de control (Centralizado o descentralizado) que permita a robots cooperar eficazmente con el fin de recolectar objetos en un cuerpo de agua que en un futuro podría ayudar a la descontaminación de fuentes hídricas de forma eficiente y casi autónoma.

Además, en el programa de ingeniería Mecatrónica de la universidad Piloto de Colombia se impulsaría el estudio de la robótica cooperativa, con ello los estudiantes podrían tener una base en el tema así como un algoritmo como plataforma para desarrollar otros proyectos enfocados en la problemática.

## 1.5 ESTADO DEL ARTE

En los últimos años han surgido nuevas aplicaciones para la robótica, inspirados en comportamientos de la naturaleza (como en algunos casos de desarrollos tecnológicos), ese es el caso de la robótica cooperativa, la cual busca diseñar un sistema compuesto por mínimo dos robots para solucionar problemas en conjunto, más complejos que el que podría resolver un solo robot<sup>4</sup>.

En 1948, W. Grey Walter, en la figura 1, inicia los estudios de la robótica cooperativa al construir dos plataformas autónomas que exploraban su entorno en busca de una fuente de luz y dirigiéndose hacia ella. Siendo éste uno de los primeros avances en cuanto a robótica móvil<sup>5</sup>. Posteriormente, en 1960 la Universidad Johns Hopkins presenta a Bestia, un robot con un sonar que se desplazaba autónomamente, pero cuando sus baterías se descargaban debía encontrar una toma de corriente. Este robot interactuaba con su base de carga

---

<sup>4</sup> CORREA, Daniel y SANABRIA, Fredy. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. Robots de servicios cooperativos. [en línea]. Marzo 2010. Vol. 2 [Consultado 24 de Mayo de 2015]. P. 119-127. Disponible en: <  
[http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_40/recursos/03\\_v13\\_18/revista\\_16/27102011/18.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/03_v13_18/revista_16/27102011/18.pdf)>. ISSN 1692-7257.

<sup>5</sup>MOLINA, Manuel y RODRÍGUEZ, Edgar. Flotilla de Robots Para Trabajos en Robótica Cooperativa. [en línea]. Mayo 2014 [Consultado 24 de Mayo de 2015], Disponible en: <  
<http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/12129/1/FLOTILLA%20DE%20ROBOTS%20PARA%20TRABAJOS%20EN%20ROBOTICA%20COOPERATIVA.pdf>>

para saber su ubicación y alinearse con ella; éste es considerado el primer conjunto de robots que interactúan para mantener una posición específica<sup>6</sup>.

Figura 1. Grey Walter en el trabajo<sup>7</sup>.



Fuente: MOLINA, Manuel y RODRÍGUEZ, Edgar. Flotilla de Robots Para Trabajos en Robótica Cooperativa.

Los sistemas multi-robot han recibido una gran atención recientemente debido a su potencial para solucionar tareas complejas, pues se utilizan grupos de robots relativamente simples que interactúan y cooperan entre sí, con el fin de solucionar de manera conjunta tareas que por sí solos no lograrían, la mayoría de ellas de tipo distribución como el monitoreo de ambientes, búsqueda y rescate, agricultura y seguridad<sup>8</sup>. De acuerdo con algunos trabajos de investigación los vehículos

---

<sup>6</sup> BROOKS, R.A., 1986. A Robust Layered Control System For a Mobile Robot. IEEE J. Robot. Autom. 2, 14–23

<sup>7</sup> MOLINA y RODRÍGUEZ.Op. Cit., p. 30.

<sup>8</sup> DUCATELLE, Frederick, *et al.* Swarm Intelligence. Cooperative Navigation in Robotic Swarms [en línea]. [consultado 2 de Julio de 2015]. p. 1-37. Disponible en: <[http://infoscience.epfl.ch/record/190825/files/dtn\\_navigation-si-web.pdf](http://infoscience.epfl.ch/record/190825/files/dtn_navigation-si-web.pdf)>

acuáticos pequeños son más atractivos para este tipo de operaciones multi-robot debido a que se minimizan algunos problemas críticos con el movimiento en el agua, y son ideales en inundaciones, monitoreo y batimetría<sup>9</sup>.

Muchas organizaciones han estado interesadas desde 1990, con el seguimiento de los contaminantes en el agua, la evaluación de los cambios ambientales, el monitoreo del nivel del mar, la topografía de la costa y la comprensión de la biodiversidad, pero este monitoreo se hace difícil al haber tanto espacio de donde obtener información, es por eso que construir dispositivos que se dispersen para conseguirla es una buena solución.

Un trabajo de investigación desarrolló un sistema autónomo multi-robot de bajo costo el cual utiliza los sensores que vienen incorporados en los teléfonos inteligentes para la navegación y localización de cada bote<sup>10</sup>, así, al trabajar de forma cooperativa, flotas de barcos pueden cubrir grandes áreas que de otra manera serían impracticables, llevarían mucho tiempo y sería muy costoso para un solo barco. En ésta investigación se utiliza un hidrodreslizador como prototipo y estructura para cada unidad que hace parte del grupo, ya que puede desplazarse en zonas poco profundas o donde el ecosistema es delicado, pues ninguna pieza hace contacto con el agua o lo que esté bajo ella.

Las investigaciones han tenido un crecimiento reciente ya que se ha notado de los múltiples beneficios que conlleva trabajar en grupo, como por ejemplo:

- Solucionar fácilmente tareas que antes podrían ser complicadas para un solo robot, o desarrollarlas de forma más eficiente.
- El uso de varios robots simples puede ser más económico, más fácil y más tolerante o flexible a fallas, que tener un robot súper robusto para cada tarea por separado.
- El enfoque inherente constructivo y sintético, puede posiblemente producir conocimientos sobre los problemas fundamentales de las

---

<sup>9</sup>SCERRI, Paul; VELAGAPUDI, Prasanna; KANNAN, Balajee; VALADA, Abhinav; TOMASZEWSKI, Christopher; DOLAN, John; SCERRI, Adrian; SHAURYA, Kumar; BILL, Luis y KANTOR, George. Real-World Testing of a Multi-Robot Team. [En línea]. [Consultado el 1 de Julio de 2015] Disponible en: <<http://repository.cmu.edu/robotics/905/>>

<sup>10</sup>VALADA, Abhinav; VELAGAPUDI, Prasanna; KANNAN, Balajee; TOMASZEWSKI, Christopher; KANTOR, George y SCERRI, Paul. Development of a Low Cost Multi-Robot Autonomous Marine Surface Platform- [En línea]. [Consultado el 28 de Junio de 2015] Disponible en: <[https://www.ri.cmu.edu/publication\\_view.html?pub\\_id=7069](https://www.ri.cmu.edu/publication_view.html?pub_id=7069)>



ciencias sociales (Teorías de la organización, economía, la psicología cognitiva), y ciencias de la vida (Biología teórica, etología de los animales)<sup>11</sup>.

A medida que el número de robots móviles aumenta, controlar dicho sistema se vuelve más complejo. Los métodos para manejar tal complejidad incluyen el control centralizado y el control descentralizado<sup>12</sup>. En el primero (centralizado) todas las funciones de planificación y decisión se realizan en un centro de control. Cada robot tiene pocos sensores simples para el control y guiado, el actuador para el funcionamiento, y los medios de comunicación para intercambiar los datos con el centro de control, quien maneja los movimientos y resuelve los conflictos rápidamente. El problema de este tipo de control es que el sistema entero se detiene si hay alguna falla en el centro de control. Por otro lado, cuando el control se hace descentralizado cada robot reconoce su entorno y planifica sus acciones de control mediante el uso de múltiples sensores y un controlador. Este método puede tener un centro de control pero se limita a la transmisión de información de los robots y asignación de tareas del sistema, pero en caso de una situación imprevista, cada robot está capacitado para encontrar una solución sin esperar órdenes del centro de control.

## **1.6 OBJETIVOS**

### **1.6.1 Objetivo general**

Diseñar un algoritmo de cooperación para prototipos de robots acuáticos no sumergibles para la recolección de objetos flotantes.

### **1.6.2 Objetivos específicos**

- Seleccionar la estructura mecánica para los robots acuáticos cooperativos que permita la recolección de objetos flotantes.
- Seleccionar la metodología de cooperación para los robots acuáticos cooperativos.

---

<sup>11</sup> CAO, FUKUNAGA y KAHNG. Op. Cit., p. 1.

<sup>12</sup> SORIA, Carlos; CARELLI, Ricardo; KELLY, Rafael e IBARRA, Juan. Control de Robots Cooperativos Por Medio de Visión Artificial. [en línea]. [Consultado 23 Mayo de 2015] Disponible en: <[http://www.inaut.unsj.edu.ar/Files/Ca1661\\_04.pdf](http://www.inaut.unsj.edu.ar/Files/Ca1661_04.pdf)>

- Diseñar los circuitos electrónicos de control, de comunicación y potencia para los prototipos de robots acuáticos cooperativos.
- Integrar a la estructura mecánica seleccionada los circuitos electrónicos con el fin de realizar pruebas de funcionamiento.

## **1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES**

La robótica cooperativa se evidencia claramente cuando dos o más robots autónomos son capaces de comunicarse para la solución de un problema determinado, y debido a esta definición se pretende alcanzar una meta de desarrollo y construcción de dos (como mínimo) a cuatro prototipos, donde se apreciaría de manera clara la cooperación entre ellos.

Con base en la construcción de los prototipos de los robots acuáticos, se usará un vehículo acuático no sumergible que satisfaga algunos requerimientos a establecer, con el fin de lograr que el robot flote y se desplace sin complicaciones de estabilidad, permitiendo además desarrollar el enfoque en la construcción del sistema electrónico para la cooperación.

Como el alcance del proyecto se ve limitado a la construcción de prototipos funcionales, los robots podrán demostrar la técnica de cooperación para la solución de un problema, como el de recoger desechos flotantes, pero aplicado a la recolección de objetos más pequeños y sin un alto grado de contaminación en el ambiente. Las características del ambiente real establecen que el robot acuático no sumergible debe presentar un grado de robustez en cuestión de materiales de fabricación, resistencia a la filtración de agua, estabilidad, entre otros.

Debido a que se desea una cooperación autónoma entre los robots acuáticos, se usarán diversas herramientas para la navegación, ubicación, desplazamiento y comunicación. Entre las herramientas que se pueden usar para alcanzar la cooperación entre los individuos, se contemplan los módulos GPS (sistema de posicionamiento global) o las cámaras de visión artificial para la navegación y ubicación de cada uno, los sensores de ultrasonido o infrarrojos para la detección de objetos, el bluetooth, XBee, Wi-Fi o radio frecuencia para la comunicación inalámbrica. Cada herramienta tiene sus ventajas y desventajas en su campo de aplicación, sin embargo se tendrán en cuenta las más adecuadas para su implementación en los prototipos.

## **1.8 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DEL PROGRAMA**

El proyecto presentado se ajusta a la línea de investigación de Robótica y Biomecatrónica debido a que el desarrollo abarca los campos de investigación de la robótica cooperativa, robótica móvil cooperativa, robótica móvil acuática. Estos campos de investigación tienen sus bases en teorías que van más allá de la robótica o la ingeniería, muchas de estas teorías se encuentran en los campos de la biología, las ciencias sociales, el comportamiento de las especies, entre otras.

Las teorías que fundamentan los campos de investigación en los cuales se basa el desarrollo del proyecto, son aplicadas principalmente en software como algoritmos de programación, haciendo referencia a la herramienta de procesamiento de datos y toma de decisiones para lograr un comportamiento cooperativo.

## **1.9 MARCO TEÓRICO**

Con el fin de abordar el problema planteado, se proporciona el marco teórico de los conceptos y las bases de investigación encontradas en trabajos similares sobre aplicaciones de la robótica cooperativa. Además, los conceptos relacionados con la estructura mecánica o cuerpo flotante del robot acuático son también mencionados, lo mismo que dispositivos electrónicos como microcontroladores, sensores, circuitos de potencia, entre otros.

### **1.9.1 Cooperación**

La cooperación es un comportamiento colectivo entre individuos en busca de beneficios mutuos o propios y este comportamiento se puede ver en diferentes sectores como lo son el financiero, el social, el militar, el deportivo (deportes de equipo), entre otros<sup>13</sup>. La naturaleza ha sido una base para el desarrollo de la cooperación en el campo de la robótica, y por ejemplo se destaca el comportamiento de las colonias o enjambres, donde el trabajo de cada individuo que la integra es importante para desempeñar diferentes tareas y poder obtener beneficios.

---

<sup>13</sup> CAO, FUKUNAGA y KAHNG. Op. Cit., p. 2.

## **1.9.2 Cooperación en la naturaleza**

Con el creciente avance de la tecnología, muchas investigaciones y desarrollos han sido inspirados en los comportamientos de la naturaleza, esto se ha hecho con el fin de obtener beneficios en cualquier aspecto. La tecnología bioinspirada se centra en la evolución que ha tenido la naturaleza y en su capacidad de adaptarse al ambiente para desarrollar diferentes tareas, un ejemplo es el comportamiento cooperativo. El estudio de la cooperación en la naturaleza ha resaltado dos comportamientos, el comportamiento eusocial y el comportamiento cooperativo<sup>14</sup>.

### **1.9.2.1 Comportamiento eusocial**

El comportamiento eusocial (del prefijo griego eu, bueno) se puede apreciar en muchas especies de insectos, como por ejemplo colonias de hormigas o abejas, donde hay una clasificación genética y la cooperación es necesaria para la supervivencia de la colonia. En las especies eusociales, algunos miembros no se reproducen con tal de garantizar la supervivencia de los descendientes de los miembros que sí se reproducen, lo que se traduce como la supervivencia de la especie.

### **1.9.2.2 Comportamiento cooperativo**

El comportamiento cooperativo está presente en animales grandes, donde la cooperación es el resultado de la búsqueda individual de maximizar su utilidad, esto se puede apreciar en las especies de animales que cazan en manada como los lobos o las hienas. A diferencia de los miembros de las especies eusociales, los miembros de las especies con comportamiento cooperativo no sacrifican su reproducción para garantizar la supervivencia de los descendientes de otros miembros.

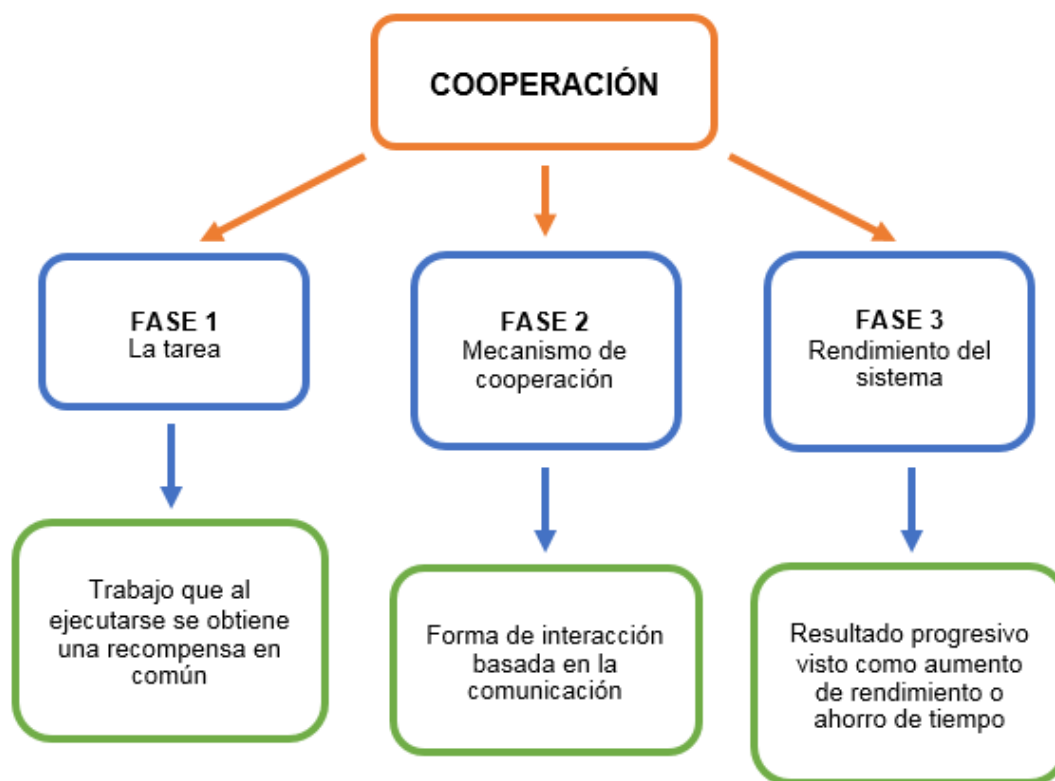
---

<sup>14</sup>Ibid., p. 10.

### 1.9.3 Cooperación en robótica

En el campo de la robótica, el comportamiento cooperativo está dividido en tres fases: una fase inicial conocida como la tarea asignada; una fase de desarrollo por medio del mecanismo de cooperación; y una fase final donde se ven los resultados en términos de rendimiento del sistema<sup>15</sup>. La figura 2 ilustra el concepto del comportamiento cooperativo en la robótica.

Figura 2. Cooperación en el campo de la robótica.



Fuente: Propia del autor.

La cooperación en la robótica ha permitido el desarrollo de múltiples robots para cumplir tareas que son complejas para un solo robot, garantizando beneficios en rendimiento, costos de fabricación, tolerancia a fallos, flexibilidad de aplicación,

---

<sup>15</sup> Ibid., p. 2.

entre otros más. La investigación y el desarrollo de la cooperación en la robótica tienen mayor presencia en la robótica de manipuladores y en la robótica móvil (terrestre, aérea y acuática), con el objetivo a futuro de aplicación en ambientes difíciles para el ser humano como por ejemplo la robótica espacial.

En la robótica de manipuladores, la cooperación entre los operadores humanos y los manipuladores robóticos tiende a mejorar el rendimiento y la flexibilidad de los entornos industriales. Como la seguridad de los operadores humanos siempre debe ser garantizada, el comportamiento de los robots debe modificarse cuando ocurra algún riesgo de colisión entre ellos<sup>16</sup>.

#### **1.9.4 Generación del cooperativismo**

Para que un sistema de múltiples robots sea cooperativo, se deben tener en cuenta 5 aspectos que lo describan totalmente. Los aspectos a mencionar también se encuentran en la naturaleza sin importar que sean especies con comportamiento eusocial o comportamiento cooperativo.

##### **1.9.4.1 Arquitectura del grupo**

La arquitectura del grupo proporciona la infraestructura sobre la que se aplican los comportamientos colectivos, y determina las capacidades y limitaciones del sistema de múltiples robots.

##### **1.9.4.1.1 Centralización y descentralización**

La centralización es una arquitectura basada en un centro de control que realiza la planificación y toma de decisiones de todo el sistema y comunica a cada integrante del sistema la tarea que debe desempeñar. La arquitectura centralizada no es muy usada debido a que si falla el centro de control el sistema no funciona correctamente<sup>17</sup>. Para un gran número de individuos, las comunicaciones del

---

<sup>16</sup> CORRALES, J; GARCÍA GÓMEZ, G; TORRES, F y PERDEREAU, V. International Journal of Advanced Robotic Systems. Cooperative Tasks between Humans and Robots in Industrial Environments. [en línea]. Mayo – Junio 2012. Vol. 9[consultado 21 de Mayo de 2015]. p. 1-10. Disponible en: < <http://www.isir.upmc.fr/files/2012ACLI2444.pdf>>

<sup>17</sup> SORIA, CARELLI, KELLY e IBARRA. Op. Cit., p. 2.

centro de control se ven afectadas debido al tiempo de transmisión que se requiere para cubrir la cantidad total de población.

La descentralización, es la arquitectura opuesta a la centralizada. Cada integrante del sistema está equipado con sensores para el reconocimiento del entorno y con el controlador para que planifique las acciones para cualquier situación imprevista. El robot está capacitado para planificar un nuevo camino o encontrar una solución sin esperar las órdenes de un centro de control<sup>18</sup>. Existen dos tipos de arquitectura descentralizada, una de ellas es la arquitectura distribuida, donde todos los individuos son iguales con respecto al control, y la otra es la arquitectura jerárquica, donde los individuos están centralizados a nivel local<sup>19</sup>. La arquitectura descentralizada tiene varias ventajas sobre la arquitectura centralizada, entre estas están la tolerancia a fallos, la fiabilidad, la escalabilidad, la flexibilidad y la robustez.

Una colonia de insectos es un sistema naturalmente descentralizado que exhibe flexibilidad y robustez, dos características deseables en un sistema artificial<sup>20</sup>, por ende, las investigaciones son enfocadas en el comportamiento de las colonias, generalmente de hormigas. Aunque para sistemas con gran número de robots móviles (haciendo la analogía con una colonia de hormigas) el sistema se vuelve más complejo de controlar sin importar la arquitectura (centralizada o descentralizada)<sup>21</sup>.

#### **1.9.4.1.2 Grupo homogéneo y heterogéneo**

Un grupo homogéneo está conformado por individuos con capacidades idénticas, mientras que un grupo heterogéneo es lo contrario. El uso de un grupo heterogéneo es introducido en la asignación de tareas que se hacen más difíciles y cuando hay necesidad de modelar otros individuos en el grupo<sup>22</sup>.

---

<sup>18</sup> Ibid., p. 2.

<sup>19</sup> CAO, FUKUNAGA y KAHNG. Op. Cit., p. 5.

<sup>20</sup> KUBE, Ronald y BONABEAU, Eric. Robotics and Autonomous Systems. Cooperative transport by ants and robots. [en línea]. Enero 2000. Vol. 30 [consultado 26 de Mayo de 2015]. p. 85-101. Disponible en: <<http://webdocs.cs.ualberta.ca/~kuba/papers/KubeBonabeauRAS2000.pdf>>

<sup>21</sup> SORIA, CARELLI, KELLY e IBARRA. Op. Cit., p. 1.

<sup>22</sup> CAO, FUKUNAGA y KAHNG. Op. Cit., p. 5.

En un grupo de robots heterogéneo, lograr un comportamiento cooperativo se vuelve más complicado debido a que los robots tienen características diferentes, responden a diferentes estímulos, o responden de manera diferente a los mismos estímulos<sup>23</sup>. Sin embargo, el uso de un grupo heterogéneo provee mayor flexibilidad<sup>24</sup>. En el caso de estudio de Ducatelle, Di Caro y Gambardella, el sistema de múltiples robots es heterogéneo y está conformado por grupos de robots homogéneos, más no todos los robots individuales tienen capacidades diferentes<sup>25</sup>.

#### **1.9.4.1.3 Estructura de comunicación**

Cao, Fukunaga y Kahng<sup>26</sup> presentaron que la estructura de comunicación de un grupo determina los posibles modos de interacción entre los individuos y se caracterizan tres tipos de interacción: interacción a través del medio ambiente, interacción a través de la detección e interacción a través de comunicaciones.

- Interacción a través del medio ambiente: Es el tipo de interacción más limitado y simple. Se produce cuando el ambiente es el medio de comunicación y no existe una comunicación directa o interacción entre los individuos. Grassé nombró la estigmergia como la comunicación indirecta de los insectos a través de alteraciones en el ambiente<sup>27</sup>.
- Interacción a través de la detección: Se refiere a las interacciones locales que se producen entre individuos como un resultado de la detección entre ellos pero sin comunicación directa. Este tipo de interacción requiere la habilidad de que los individuos se distingan entre

---

<sup>23</sup>KUBE y BONABEAU. Op. Cit., p. 86.

<sup>24</sup> DUCATELLE, Frederick; DI CARO, Gianni y GAMBARDELLA, Luca. Cooperative Stigmergic Navigation in a Heterogeneous Robotic Swarm. [en línea]. Agosto 2010. Vol. 6226 [consultado 18 de Mayo de 2015]. p. 607-617. Disponible en: <<http://www.swarmanoid.org/upload/pdf/DucDicGam10b.pdf>>. ISSN 0302-9743.

<sup>25</sup> Ibid., p. 608.

<sup>26</sup> CAO, FUKUNAGA y KAHNG. Op. Cit., p. 6.

<sup>27</sup> KUBE y BONABEAU. Op. Cit., p. 86.



ellos y que además diferencien los objetos en el ambiente. Esta interacción es indispensable para modelar otros individuos.

- Interacción a través de comunicaciones: Esta forma de interacción implica la comunicación directa con otros individuos ya sea por la emisión dirigida o intencional de información. Debido a que la arquitectura que permite esta interacción es similar a las redes de comunicación, muchos temas del campo de las redes surgen, incluyendo el diseño de topologías de red y protocolos de comunicación.

#### **1.9.4.1.4 Modelado de otros individuos**

El modelado de las interacciones, acciones, capacidades y estados de otros individuos puede conducir a una cooperación más eficaz entre robots<sup>28</sup>. Los requisitos de comunicación también se pueden reducir si cada individuo tiene la capacidad de modelar otros individuos. El individuo modelador debe tener alguna representación de los demás individuos del sistema y esa representación puede ser usada para hacer inferencias acerca de las acciones que tomaran.

En la robótica cooperativa, el modelado de individuos ha sido explorado más extensivamente en el contexto de la manipulación de objetos grandes (box-pushing). Muchas soluciones han explorado si el objeto puede servir como un medio común para el cual los agentes pueden modelarse el uno al otro. Otros contextos donde se ha explorado el modelado de individuos son la navegación entre dos puntos evitando congestión en los caminos y el comportamiento de auto organización para la recolección de objetos.

#### **1.9.4.2 Conflicto de recursos**

El conflicto de recursos ocurre cuando un único recurso es requerido por múltiples robots, entre los recursos se encuentran el espacio, las comunicaciones, las tareas, entre otros. Con un sistema de múltiples robots, el conflicto de recursos ocurre cuando hay una necesidad de asignar y usar los recursos, pero se puede evitar si el sistema los administra adecuadamente<sup>29</sup>.

---

<sup>28</sup>CAO, FUKUNAGA y KAHNG. Op. Cit., p. 7.

<sup>29</sup> CADENA, Raúl y MORENO, Jhonattan. Diseño y construcción de una plataforma robótica cooperativa basada en el sistema embebido Primer\_2 para la gestión y manejo de inventarios. [en

### **1.9.4.3 Orígenes de cooperación**

Según Cao, Fukunaga y Kahng<sup>30</sup>, la cooperación se ha caracterizado por diferentes comportamientos, y entre estos se resaltan el comportamiento eusocial y el comportamiento cooperativo. El comportamiento eusocial se puede apreciar en muchas especies de insectos, como por ejemplo colonias de hormigas o abejas, donde hay una clasificación genética y la cooperación es necesaria para la supervivencia de la colonia. Por otro lado, el comportamiento cooperativo está presente en animales grandes, donde la cooperación es el resultado de la búsqueda individual de maximizar su utilidad, esto se puede apreciar en las especies de animales que cazan en manada como los lobos o las hienas.

### **1.9.4.4 Capacidad de aprendizaje**

Para los sistemas de múltiples robots, encontrar los valores correctos para los parámetros de control que conducen a un comportamiento cooperativo con capacidad de aprender puede ser una tarea difícil. Sin embargo, es altamente deseable que los sistemas de múltiples robots tengan la capacidad de aprender los valores de los parámetros de control con el fin de optimizar el rendimiento de las tareas y adaptarse a los cambios en el medio ambiente.

La capacidad de aprender se puede apreciar en los sistemas robustos donde el comportamiento cooperativo se aproxima al comportamiento cooperativo de las especies de insectos, es decir que la búsqueda, navegación, recolección, auto organización, y otras características de las especies cooperativas, se logran más rápido. Además, algunas técnicas inspiradas por la evolución biológica han sido usadas en la robótica cooperativa para fortalecer la capacidad de aprendizaje de los robots, como por ejemplo los algoritmos genéticos y las redes neuronales.

### **1.9.4.5 Problemas geométricos**

Debido a que los individuos que pertenecen a los sistemas de múltiples robots móviles deben desplazarse e interactuar con cada robot de forma física, los problemas geométricos son inherentes. Los problemas geométricos que han sido

---

línea]. 2011. [consultado 27 de Mayo de 2015]. p. 1-120. Disponible en: < <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/3512/2/139279.pdf> >

<sup>30</sup> CAO, FUKUNAGA y KAHNG. Op. Cit., p. 10.

estudiados en la robótica cooperativa son la planificación de trayectorias, el movimiento en formación y la generación de patrones.

#### **1.9.4.5.1 Planificación de trayectorias**

La planificación de trayectorias de múltiples robots requiere que los individuos sean capaces de planear rutas que no se intersecten. Éste es un caso de conflicto de recursos, ya que los agentes y sus objetivos están presentes en una cantidad finita del espacio<sup>31</sup>. La centralización y distribución son dos formas de presentar la planificación de trayectorias en la robótica móvil. La planificación de trayectorias centralizada tiene en cuenta a todos los individuos del sistema, mientras que la planificación distribuida planifica la trayectoria de cada individuo independientemente.

#### **1.9.4.5.2 Problemas de formación y marcha**

Los problemas de formación y marcha se presentan en múltiples robots que deben formar un patrón y movimiento específico. Estos problemas han sido analizados y estudiados, en su mayoría, en ambientes de simulación y reales sobre operaciones cooperativas de manipulación de cargas. La solución de estos problemas es muy interesante en términos de algoritmos distribuidos, equilibrio entre conocimiento local y global, e información intrínseca para una tarea determinada.

### **1.9.5 Robótica móvil cooperativa**

La robótica móvil es quizá la rama de la robótica con mayor número de investigaciones y avances tecnológicos en cuanto a cooperación, siendo la robótica móvil terrestre la más avanzada. Como la naturaleza es la principal herramienta de estudio, la robótica móvil cooperativa tiene sus bases en el comportamiento de las especies de insectos eusociales (en su mayoría hormigas), también conocida como robótica de enjambres. La robótica de enjambres<sup>32</sup> es el estudio de grupos grandes de robots simples que interactúan y cooperan entre sí

---

<sup>31</sup> Ibid., p. 11.

<sup>32</sup> DUCATELLE, *et al.* Op. Cit., p. 2.

con el fin de resolver tareas que sobrepasan las capacidades propias de cada robot.

Con la intención de acercarse a un comportamiento cooperativo flexible y robusto como el de los insectos eusociales, las investigaciones aplicadas a la robótica cooperativa móvil o robótica de enjambres se enfocan en la búsqueda, navegación, manipulación y recolección. Se han obtenido aportes en temas como algoritmos de navegación robustos, redes de comunicación indirecta para sistemas descentralizados, reconocimiento del ambiente a partir de visión artificial, manipulación y recolección de objetos grandes y pesados (box-pushing), entre otros. Dichos aportes en la robótica cooperativa se han validado en ambientes simulados y físicos con robots móviles terrestres de ruedas obteniendo resultados favorables.

También existen investigaciones donde el sistema de múltiples robots está formado por robots simples con capacidades diferentes (sistema heterogéneo). Ducatelle, Di Caro y Gambardella<sup>33</sup> utilizan un sistema de múltiples robots heterogéneo que es capaz de encontrar las trayectorias factibles para el desplazamiento de un grupo de robots móviles terrestres, según la información captada y transmitida del ambiente por un grupo de robots móviles aéreos. Además, el sistema es capaz de encontrar los caminos más cortos y de tomar diferentes caminos en caso de que exista congestión.

### **1.9.6 Vehículos acuáticos**

Los vehículos acuáticos, también llamados embarcaciones, se encuentran divididos en dos grupos, los que se desplazan sobre el agua, y los que se desplazan sumergidos. Su desarrollo y evolución se ha dado por diversas actividades como el transporte de mercancías o personas, las guerras navales (por ejemplo la Primera y Segunda Guerra Mundial), la pesca, entre otros, que han tenido presencia tanto en vía marítima como fluvial.

Los vehículos acuáticos que se desplazan sobre el agua están clasificados según algunas características como lo son, dimensiones, material, estabilidad, maniobrabilidad, medio de propulsión y otras más. La mayor cantidad de vehículos acuáticos están clasificados como barcos, buques y botes, como los que se ven en la figura 3. Por otro lado, los vehículos que se desplazan sumergidos son comúnmente los submarinos, que además tienen la capacidad de navegar sobre

---

<sup>33</sup> DUCATELLE, DI CARO y GAMBARDELLA. Op. Cit., p. 616-617.

el agua, y unos vehículos diseñados para la inmersión profunda llamados batiscafos y usados para la exploración de las profundidades marítimas.

Figura 3. Ejemplos de barco, buque y bote.



Fuente: DEFINICIÓN Y QUE. Definición y que es BARCO (izquierda), DOMINGYRZ, Jhasson. Ingeniería en Maquinaria Naval (centro) y MAPIO. Purranque (derecha).

### **1.9.7 Componentes electrónicos**

Como componentes electrónicos usados en robótica móvil cooperativa resaltan las tarjetas electrónicas de desarrollo, las tarjetas electrónicas de potencia, los módulos de comunicación, los módulos de posicionamiento, los sensores, entre otros como motores y servomotores.

#### **1.9.7.1 Tarjetas electrónicas de desarrollo**

Las tarjetas electrónicas de desarrollo son placas que cuentan principalmente con un microcontrolador y son diseñadas para el aprendizaje de programación y desarrollo de aplicaciones electrónicas básicas. Algunas tarjetas se pueden ver en la figura 4. Sin embargo, con la creciente evolución de los microcontroladores y la electrónica en general, existen tarjetas de desarrollo potentes que integran sensores, módulos de comunicación, procesadores de alta velocidad, memorias de gran capacidad, y otros componentes y conectores de periféricos, permitiendo el desarrollo y ejecución de aplicaciones electrónicas con un mayor grado de complejidad.

Figura 4. Tarjetas electrónicas de desarrollo comerciales.

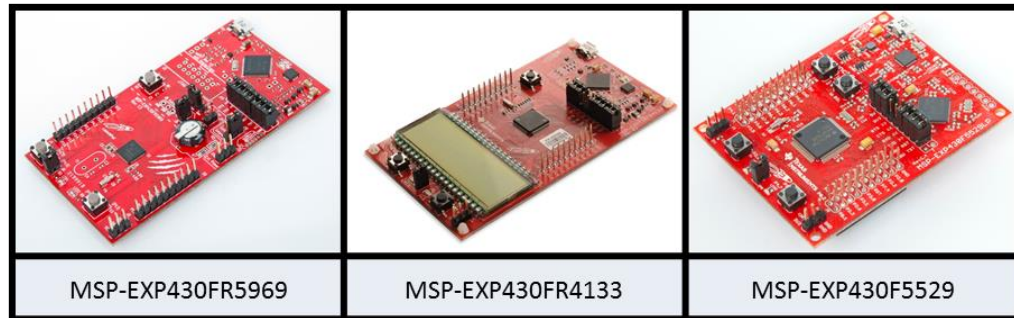


Fuente: MAKE:.. Which Board is Right for Me?

Las tarjetas de desarrollo se diferencian principalmente por las características de procesamiento y memoria que cuenta el microcontrolador que poseen. Entre algunas tarjetas de desarrollo conocidas se encuentran el Arduino UNO, siendo una de las tarjetas de desarrollo básicas, comúnmente usadas para proyectos pequeños y la introducción a la programación de microcontroladores. Algunas tarjetas de desarrollo de distintos fabricantes de semiconductores que pueden ser apropiadas para el proyecto son descritas a continuación:

- Texas Instruments fabrica tarjetas de desarrollo económicas conocidas como LaunchPads y algunos ejemplos son los que se muestran en la figura 5. Estas tarjetas se encuentran divididas en cuatro grupos según sus características y especificaciones. Las MSP LaunchPads son tarjetas con un bajo consumo de energía que permiten aplicaciones de propósito general. Las C2000 LaunchPads son usadas para el control de motores y aplicaciones de control digital en tiempo real. Las Connected LaunchPads son apropiadas para la conexión de periféricos analógicos y de comunicación como Wi-Fi, Ethernet y USB. Y Las Hercules LaunchPads que están diseñadas para aplicaciones de seguridad.

Figura 5. Ejemplos de tarjetas de desarrollo de Texas Instruments.



Fuente: TEXAS INSTRUMENTS. MSP430 Design Workshop.

El LaunchPap MSP-EXP430F5529LP es una tarjeta de desarrollo del grupo de las MSP LaunchPads basada en el microcontrolador MSP430F5529 de 16 bits. Tiene 128KB de memoria flash, 8 KB de RAM, velocidad de procesamiento de 25 MHz, cinco timers de 16 bits, dieciséis canales de ADC de 12 bits, interfaces de comunicación (2 I<sup>2</sup>C, 4 SPI o 2 UART's)<sup>34</sup>, entre otros.

El LaunchPad MSP-EXP432P401R es otra tarjeta de desarrollo con bajo consumo de energía que está basada en el microcontrolador MSP432P401R de 32 bits con ARM Cortex M4F para gran desempeño. Tiene 256 KB de memoria flash, 64 KB de RAM, velocidad de procesamiento de 48 MHz, cuatro timers de 16 bits y dos timers de 32 bits, un MSPS ADC de bajo consumo de 14 bits, interfaces de comunicación (4 I<sup>2</sup>C, 8 SPI o 4 UART's)<sup>35</sup>, entre otros.

- Microchip Technology cuenta con una tarjeta de desarrollo para la familia dsPIC33F y PIC24H llamada Microstick, siendo una herramienta de bajo costo para el diseño de microcontroladores de 16 bits. La tarjeta funciona con el microcontrolador PIC24HJ64GP502 que cuenta con 64

---

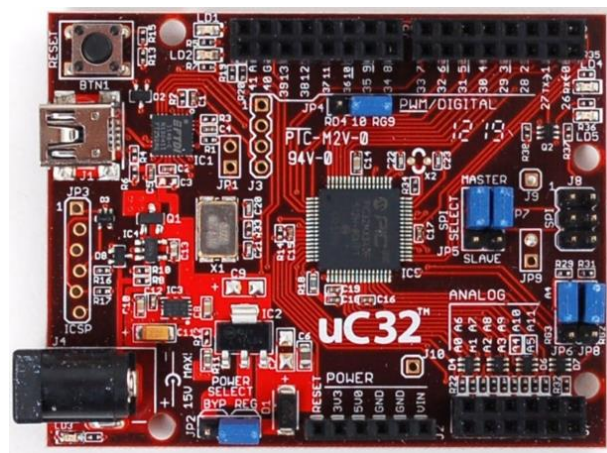
<sup>34</sup>TEXAS INSTRUMENTS. MSP-EXP430F5529LP LaunchPad™ Development Kit. [en línea]. Septiembre 2013. [consultado 22 de Junio de 2015]. p. 1-61. Disponible en: <<http://www.ti.com/lit/ug/slau533b/slau533b.pdf>>.

<sup>35</sup>TEXAS INSTRUMENTS. MSP-EXP432P401R LaunchPad™ Evaluation Kit. [en línea]. Marzo 2015. [consultado 22 de Junio de 2015]. p. 1-39. Disponible en: <<http://www.ti.com/lit/ug/slau597/slau597.pdf>>.

KB de memoria flash, 8 KB de RAM, diez canales ADC de 10 o 12 bits e interfaces de comunicación (CAN, I<sup>2</sup>C, IrDA, LIN, PMP, SPI, UART/USART)<sup>36</sup>. O con el microcontrolador dsPIC33FJ64MC802 que cuenta con 64 KB de memoria flash, 16 KB de RAM, seis canales ADC de 10 o 12 bits, interfaces de comunicación (CAN, I<sup>2</sup>C, IrDA, LIN, SPI, UART/USART), DSP (procesador digital de señal)<sup>37</sup>, entre otros.

Otra alternativa es la chipKIT uC32 que se ve en la figura 6, la cual aprovecha el desempeño del microcontrolador PIC32MX340F512H de Microchip Technology de 32 bits. Tiene una memoria flash de 512 KB, 32 KB de SRAM y velocidad de procesamiento de 80 MHz, cuenta con doce canales ADC de 10 bits e interfaces de comunicación (I<sup>2</sup>C, IrDA, LIN, PMP, SPI, UART/USART).<sup>38</sup>

Figura 6. Tarjeta de desarrollo chipKIT uC32.



Fuente: ADAFRUIT. chipKIT uC32.

---

<sup>36</sup>MICROCHIP. PIC24HJ32GP302/304, PIC24HJ64GPX02/X04 and PIC24HJ128GPX02/X04 Data Sheet. [en línea]. 2009. [consultado 23 de Junio de 2015]. p. 1-356. Disponible en: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70293D.pdf>>.

<sup>37</sup>MICROCHIP. dsPIC33FJ32MC302/304, dsPIC33FJ64MCX02/X04 and dsPIC33FJ128MCX02/X04 Data Sheet. [en línea]. 2007-2011. [consultado 23 de Junio de 2015]. p. 1-436. Disponible en: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70291F.pdf>>.

<sup>38</sup>MICROCHIP. PIC32MX3XX/4XX Data Sheet. [en línea]. 2011. [consultado 23 de Junio de 2015]. p. 1-214. Disponible en: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/61143H.pdf>>.



- STMicroelectronics ofrece al mercado unos kits de desarrollo basados en la familia de microcontroladores de 32 bits STM32. Los microcontroladores fabricados cuentan con memoria flash, procesador ARM Cortex-M y combinan características de funcionamiento como el alto rendimiento, capacidad de ejecución en tiempo real, procesamiento de señales digitales y funcionamiento con bajo consumo de energía. La familia de microcontroladores STM32 está dividida en tres grupos que clasifican a cada microcontrolador según sus características más relevantes. El grupo de alto rendimiento está conformado por los microcontroladores STM32 F2 y STM32 F4, mientras que el grupo estándar está conformado por los STM32 F0, STM32 F1 y STM32 F3, y el grupo de ultrabajo consumo de energía por los STM32 L0 y STM32 L1.

La tarjeta STM32F4DISCOVERY, como se ve en la figura 7 (derecha), cuenta con el microcontrolador STM32F407VGT6 de 32bits, 1 MB de memoria flash, 192 KB de RAM, velocidad de procesamiento de 168 MHz, dieciséis canales A/D de 12 bits, dos canales D/A de 12 bits, interfaces de comunicación (CAN, DCMI, EBI/EMI, Ethernet, I<sup>2</sup>C, IrDA, LIN, SPI, UART/USART, USB OTG), entre otros. Además, la tarjeta de desarrollo incorpora un sensor tipo acelerómetro de tres ejes (LIS302DL o LIS3DSH) y un sensor de audio tipo micrófono digital (MP45DT02)<sup>39</sup>.

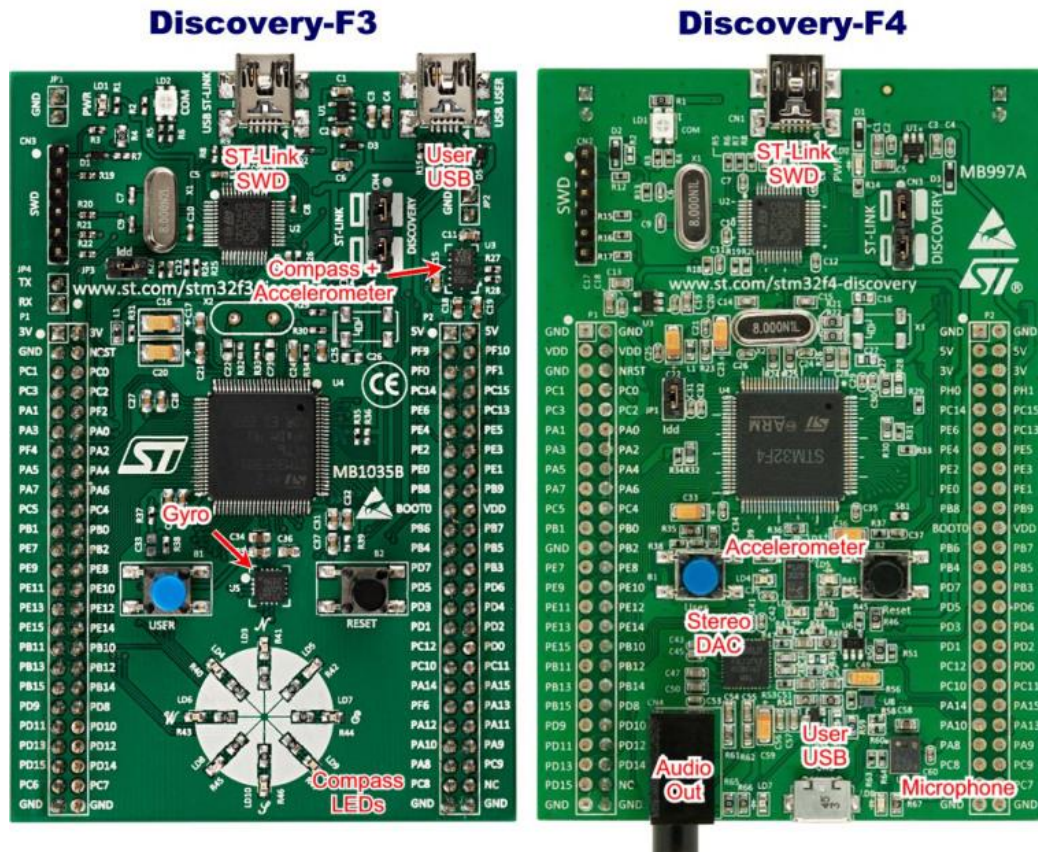
Otra tarjeta de desarrollo fabricada por STMicroelectronics es la STM32F3DISCOVERY que se ve en la figura 7 (izquierda), y que está basada en el microcontrolador STM32F303VCT6 de 32bits. Cuenta con 256KB de memoria flash, 48 KB de RAM, velocidad de procesamiento de 72 MHz, cuatro canales A/D de 12 bits, dos canales D/A de 12 bits e interfaces de comunicación (CAN, I<sup>2</sup>C, IrDA, LIN, SPI, UART/USART, USB). Además, la tarjeta posee un sensor tipo acelerómetro y brújula magnética (LSM303DLHC), y un sensor tipo giroscopio de tres ejes (L3GD20)<sup>40</sup>.

---

<sup>39</sup> STMICROELECTRONICS. STM32F4DISCOVERY. [en línea]. Septiembre 2014. [consultado 24 de Junio de 2015]. p. 1-4. Disponible en: <[http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data\\_brief/DM00037955.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00037955.pdf)>.

<sup>40</sup> STMICROELECTRONICS. STM32F3DISCOVERY. [en línea]. Octubre 2014. [consultado 24 de Junio de 2015]. p. 1-3. Disponible en: <[http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data\\_brief/DM00063389.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00063389.pdf)>.

Figura 7. Tarjetas STM32F3DISCOVERY y STM32F4DISCOVERY.



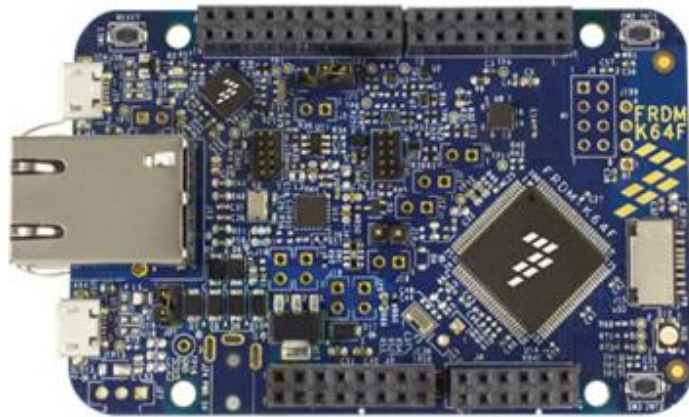
Fuente: SZCZYS, Mike. IN-DEPTH COMPARISON AT STM32 F3 AND F4 DISCOVERY BOARDS.

- Freescale Semiconductor tiene una gama de tarjetas de desarrollo basadas en microcontroladores de 32 bits con ARM Cortex-M y de bajo consumo de energía conocido como Kinetis Cortex-M. Esta gama de tarjetas está dividida en 8 grupos según sus características y entre estos grupos están el Mini MCUs, W Series, M Series, E Series y K Series.

La tarjeta de desarrollo FRDM-K64F de la figura 8, cuenta con el microcontrolador MK64FN1M0VLL12 que tiene 1 MB de memoria flash, 256 KB de RAM, velocidad de procesamiento de 120 MHz, treinta y dos canales ADC de 16 bits, un canal DAC de 12 bits, interfaces de comunicación (CAN, EBI/EMI, Ethernet, I<sup>2</sup>C, IrDA, SD, SPI,

UART/USART, USB, USB OTG) e integra un sensor tipo acelerómetro y magnetómetro (FXOS8700CQ), puerto Ethernet, ranura para tarjeta SD, entre otros<sup>41</sup>.

Figura 8. Tarjeta de desarrollo FRDM-K64F de Freescale Semiconductor.



Fuente: FREESCALE. FRDM-K64F: Freescale Freedom Development Platform for Kinetis K64, K63, and K24 MCUs.

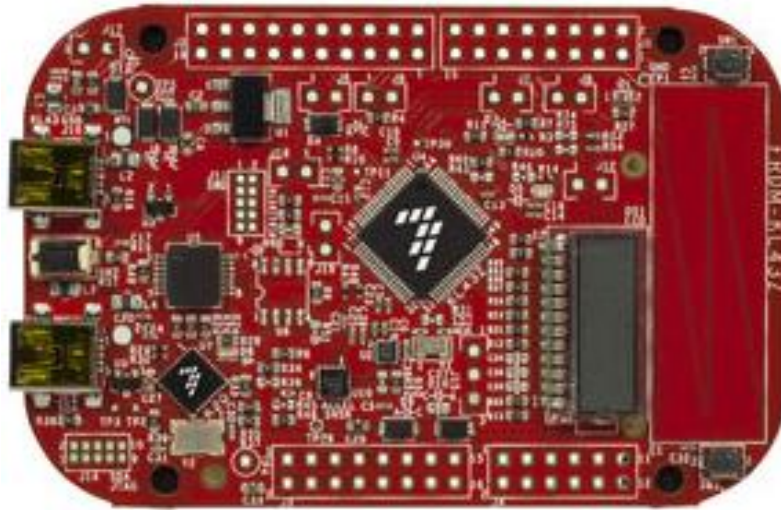
Otra alternativa que ofrece Freescale Semiconductor es la tarjeta de desarrollo FRDM-KL43Z que se ve en la figura 9, la cual cuenta con el microcontrolador MKL43Z256VLH4 que tiene 256KB de memoria flash, 32 KB de SRAM, velocidad de procesamiento de 48 MHz, dieciséis canales ADC de 16 bits, un canal DAC de 12 bits, interfaces de comunicación (I<sup>2</sup>C, SPI, UART/USART, USB) e integra un sensor capacitivo de contacto, un sensor de luz ambiente, un sensor tipo acelerómetro(MMA8451Q) y un sensor tipo magnetómetro (MAG3110), pantalla LCD de 4 segmentos, entre otros<sup>42</sup>.

---

<sup>41</sup> FREESCALE SEMICONDUCTOR. FRDM-K64F Freedom Module User's Guide. [en línea]. Abril 2014. [consultado 25 de Junio de 2015]. p. 1-21. Disponible en: <[http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/user\\_guide/FRDMK64FUG.pdf?fsp=1](http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/user_guide/FRDMK64FUG.pdf?fsp=1)>.

<sup>42</sup> FREESCALE SEMICONDUCTOR. FRDM-KL43Z User's Guide. [en línea]. Julio 2014. [consultado 25 de Junio de 2015]. p. 1-14. Disponible en: <[http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/user\\_guide/FRDMKL43ZUG.pdf?fsp=1](http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/user_guide/FRDMKL43ZUG.pdf?fsp=1)>.

Figura 9. Tarjeta de desarrollo FRDM-KL43Z de Freescale Semiconductor.



Fuente: FREESCALE. FRDM-KL43Z: Freescale Freedom Development Platform for Kinetis KL43, KL33, KL27, KL17 and KL13 MCUs.

#### 1.9.7.2 Tarjetas electrónicas de potencia

El objetivo de la electrónica de potencia consiste en convertir y controlar la energía de la forma suministrada por una fuente a la forma requerida por la carga<sup>43</sup>. Las tarjetas de potencia son circuitos compuestos por semiconductores (transistores, relés, entre otros) gobernadas por un circuito de control externo que procesa información y envía las señales para la activación y desactivación de los semiconductores.

Las tarjetas electrónicas de potencia en robótica son usadas principalmente para controlar motores de corriente alterna, de corriente continua, paso a paso y servomotores ya que la corriente eléctrica que necesita un motor para superar la inercia y efectuar el movimiento rotacional es mayor a la que puede suministrar un circuito de control o tarjeta de desarrollo. En seguida se presentan algunas tarjetas de potencia existentes en el mercado:

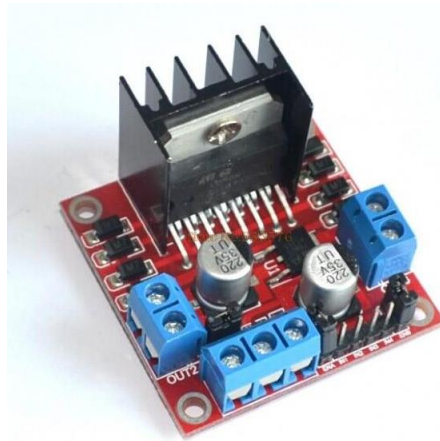
---

<sup>43</sup> POZO, Ana. Sistemas Electrónicos de Potencia. [en línea]. Marzo 2013 [consultado 9 de Junio de 2015]. Disponible en: <[http://ocw.uma.es/ingenierias/sistemas-electronicos-de-potencia/skinless\\_view](http://ocw.uma.es/ingenierias/sistemas-electronicos-de-potencia/skinless_view)>



- Una solución sencilla para un motor de corriente continua o paso a paso bipolar es la tarjeta de potencia compuesta por el circuito integrado L298N que se muestra en el figura 10, la cual permite controlar el sentido de giro y la velocidad de máximo 2 motores por medio de señales TTL que se generan de microcontroladores o tarjeta de desarrollo. Además cuenta con un regulador de voltaje (LM7805) como opción para alimentar el circuito integrado y suministra una corriente máxima de 2 A.

Figura 10. Tarjeta de potencia basada en el circuito integrado L298N.



Fuente: TRONIXLABS. Tutorial - L298N Dual Motor Controller Module 2A and Arduino.

- Para motores paso a paso, la tarjeta A4988 de la figura 11 es una herramienta apropiada ya que cuenta con limitación de corriente regulable, sobre corriente y protección de temperatura, y cinco resoluciones diferentes que permite hasta un dieciseisavo de paso. La tarjeta de potencia para motores paso a paso opera desde 8 V a 35 V y puede suministrar una corriente de 1 A por fase sin disipador o 2 A con disipador de calor.

Figura 11. Tarjeta de potencia A4988.



Fuente: POLOLU. A4988 Stepper Motor Driver Carrier.

- Los servomotores pueden conectarse a las tarjetas de desarrollo directamente para su funcionamiento, sin embargo, existen tarjetas electrónicas diseñadas para controlar servomotores como la Pololu Maestro servocontrol de 6 canales de la figura 12. Con la tarjeta de la familia Maestro es posible controlar hasta 6 servomotores con tres distintos modos como la conexión directa al PC a partir de USB, comunicación serial TTL con tarjetas de desarrollo y mediante comandos internos. La tarjeta tiene una resolución de ancho de pulso de  $0.25 \mu\text{s}$ , control de velocidad y aceleración independiente para cada canal, entre otros.

Figura 12. Tarjeta de potencia Pololu Maestro servo control de 6 canales.



Fuente: POLOLU. Micro Maestro 6-Channel USB Servo Controller (Assembled).

- Los motores brushless o sin escobillas son actuadores que no poseen colector y escobillas como un motor de corriente continua común y por esta razón funcionan en AC. Para que un motor brushless pueda funcionar se requiere de una tarjeta de potencia conocida como ESC (Electronic Speed Controllers) o circuito regulador de velocidad que se debe seleccionar según el motor que se desea controlar. La tarjeta controladora Hobby King 20A ESC 3A UBEC que se ve en la figura 13, es un ejemplo de circuito regulador de velocidad para el motor Brushless Outrunner 2300kv que entrega 5 V a 3 A con una corriente constante de entrada de 20 A, puede alimentarse con una batería LiPo de 2 o 4 celdas y se pueden programar diferentes funciones de uso.

Figura 13. Tarjeta de potencia controladora Hobby King 20A ESC 3A UBEC.



Fuente: HOBBYKING. Hobby King 20A ESC 3A UBEC (EU warehouse).

### 1.9.7.3 Módulos de comunicación

Los módulos de comunicación son tarjetas electrónicas diseñadas para comunicar tarjetas de desarrollo o microcontroladores de forma alámbrica o inalámbrica usando las distintas interfaces de comunicación (SPI, SCI, I2C, USB, Ethernet, Bluetooth, WiFi, GSM, entre otras). Existen módulos de comunicación con los que se pueden construir diferentes topologías de red según la aplicación.

La robótica hace uso de los módulos de comunicación para construir arquitecturas de tipo maestro-esclavo, punto a punto, multipunto o malla, donde las características del ambiente pueden determinar el tipo de módulo necesario para lograr una correcta comunicación. Entre los módulos de comunicación se pueden encontrar el módulo Bluetooth HC05 (maestro o esclavo) o el HC06

(esclavo), el módulo ZigBee XBee Serie 1 o Serie 2, los módulos para radiofrecuencia RF ASK, el módulo Ethernet para Arduino, entre otros más.

#### **1.9.7.4 Módulos de posicionamiento**

El módulo de posicionamiento usado para determinar la ubicación de un objeto en el planeta es el GPS (Global Positioning System) o sistema de posicionamiento global. El GPS es un sistema de navegación compuesto por satélites en órbita y estaciones terrestres, creado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos<sup>44</sup>. El uso del GPS se originó en aplicaciones militares secretas y su éxito permitió que diferentes aplicaciones lo adoptaran para tener información de la localización de cualquier objeto. Hoy en día el GPS se encuentra en celulares, automóviles, aviones, embarcaciones, entre otros.

En robótica móvil, el módulo de posicionamiento GPS se utiliza en aplicaciones donde el robot es autónomo, navega en un ambiente conocido o desconocido y se requiere información de su localización global, sin importar si son robots móviles terrestres, acuáticos, aéreos o incluso espaciales. Los módulos GPS cuentan con características de hardware que los clasifican para sus diferentes aplicaciones, siendo los más precisos, rápidos y robustos en aplicaciones espaciales, militares, de navegación terrestre, aérea y marítima.

#### **1.9.7.5 Sensores**

Según la Real Academia Española<sup>45</sup>, un sensor es un dispositivo que detecta una determinada acción externa y la transmite adecuadamente. Es decir, un sensor es un transductor que transforma una magnitud física en una señal de magnitud eléctrica, y con esto se hace posible el control y percepción de un ambiente.

Existen dos tipos de sensores, el sensor análogo y el sensor digital. El sensor análogo tiene una señal de salida en forma de rango de voltaje proporcional a la magnitud física, por ejemplo entre 0 V y 5 V. Mientras que el sensor digital está compuesto por un sensor análogo y un conversor análogo a digital (A/D) y tiene

---

<sup>44</sup> REY, Jorge. El Sistema de Posicionamiento Global - GPS. [en línea]. Mayo 2006. [consultado 5 de Junio de 2015]. p. 1-7. Disponible en: <<http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/IN/IN65700.pdf>>

<sup>45</sup> REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Sensor. [en línea]. [consultado 9 de Junio de 2015]. Disponible en: <<http://lema.rae.es/drae/srv/search?val=sensor&submit.x=42&submit.y=6>>



una señal de salida que puede ser de tres formas, una interfaz paralela de por ejemplo 8 o 16 líneas de salida digital, una interfaz de comunicación serial como el estándar RS232 o una interfaz serial síncrona<sup>46</sup>. Sin embargo, algunos sensores digitales simples funcionan como interruptores.

Hay una gran variedad de sensores con los que se equipa un robot para garantizar autonomía, flexibilidad, robustez, entre otros, cuando se esté ejecutando una tarea. Algunos sensores con los que se puede equipar un robot móvil autónomo para evitar colisiones, recolectar objetos, garantizar la correcta navegación, controlar sus movimientos, garantizar la estabilidad, el reconocimiento del ambiente, entre otros, se muestran a continuación:

- Sensor binario: Es el tipo de sensor más simple ya que envía un solo bit de información, ya sea 0 o 1, que en otras palabras puede ser apagado o encendido respectivamente. Un ejemplo de sensor binario es el interruptor que puede ser usado como sensor táctil en un robot<sup>47</sup>.
- Sensor de distancia: Esta entre los más importantes en robótica y se usa para fines de navegación en robots móviles. Los sensores de ultrasonido e infrarrojo son los más comunes para medir distancias. El sensor de ultrasonido emite una señal acústica de aproximadamente 1 ms con una frecuencia ultrasónica de 50 KHz a 250 KHz y el tiempo que tarda la señal en volver al sensor es medida e interpretada como la distancia hasta el obstáculo. Por otro lado, el sensor infrarrojo usa un LED intermitente de 40 KHz junto con un detector de infrarrojos donde el ángulo del haz reflejado determina la distancia al objeto, además existen interruptores infrarrojos de proximidad que funcionan como un sensor binario<sup>48</sup>.
- Sensor de localización: Es usado con el propósito de realizar un seguimiento de la posición y orientación de un robot, normalmente se utiliza una brújula magnética que puede ser análoga o digital. La brújula análoga es el sensor más simple y puede distinguir ocho direcciones que son representadas por diferentes niveles de voltaje. La brújula

---

<sup>46</sup>BRÄUNL, Thomas. Embedded Robotics. Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems. 2 ed. Berlin: Springer, 2006, 458 p. ISBN-10 3-540-34318-0.

<sup>47</sup>Ibid., p. 19.

<sup>48</sup>Ibid., p. 23 – 25.

digital tiene mayor resolución de direcciones pero son más complejas, y envía los datos medidos mediante interfaz de comunicación serial<sup>49</sup>.

- Sensor de orientación: Cuando es necesario determinar la orientación de un robot en el espacio tridimensional se usan sensores como giroscopios, acelerómetros e inclinómetros. Los giroscopios miden el cambio rotacional de orientación alrededor de un eje, los acelerómetros miden la aceleración a lo largo de un eje y los inclinómetros miden el ángulo de orientación absoluto alrededor de un eje<sup>50</sup>.

---

<sup>49</sup>Ibid., p. 25 – 26.

<sup>50</sup>Ibid., p. 27.

## **2. CAPITULO. ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

Para escoger la estructura se ha tenido en cuenta trabajos similares que han realizado prototipos para extraer información de cuerpos de agua, bien sean en lagos u océanos y que han recopilado y comparado anteriormente otros trabajos para escoger la mejor estructura. Por eso, con la experiencia de sus comparaciones se escogerá una estructura que permita al robot flotar estable mientras realiza una tarea, girar de modo eficiente para recolectar los objetos flotantes, y trabajar de forma segura en zonas poco profundas o en las cuales exista un ambiente ecológico frágil.

Para la mayoría de trabajos que se realizan en la superficie de cuerpos de agua, el objetivo principal es tomar datos del lugar, realizar batimetría, monitorear los ecosistemas presentes, y estudiar el cambio climático que afecta a una zona de interés. Desafortunadamente estos estudios abarcan zonas muy extensas y lejanas en las cuales no es fácil realizar el trabajo, debido además a las condiciones climáticas. Todo esto genera que las exploraciones necesiten de sistemas complejos, y de alto costo para lograr el objetivo.

### **2.2 ASC ARTEMIS**

El ASC ARTEMIS fue de los primeros vehículos no tripulados de superficie, realizado por un grupo de investigación del MIT, el cual se desarrolló con el fin de demostrar una forma económica para realizar batimetría. El navío que diseñaron se basó en un barco pesquero de arrastre del cual construyeron un modelo a escala 1/17 como se evidencia en la figura 14. “Debido a su tamaño más pequeño se simplificó enormemente el despliegue de personal y también los costos de operación”<sup>51</sup>.

Este trabajo concluyo que existen ventajas significativas al realizar la batimetría de manera autónoma. Una misión de ASC ARTEMIS se podía llevar a cabo por sólo dos personas, lo que reduce el costo asociado con el personal de apoyo. El desarrollo de vehículos pequeños, de bajo costo, y alto rendimiento puede llevar a

---

<sup>51</sup>RODRIGUEZ Claudia. Automated Bathymetry Mapping Using an Autonomous Surface Craft. S.B. Ocean Engineering. 1996. p. 21.

un montaje de múltiples ASC ARTEMIS para recopilar datos batimétricos simultáneamente. Esto lograría levantamientos batimétricos de manera económica, rápida y eficiente para grandes áreas<sup>52</sup>.

Figura 14. Barco pesquero de arrastre a escala, ASC ARTEMIS



Fuente: Automated Bathymetry Mapping Using an Autonomous Surface Craft. S.B. Ocean Engineering.

Lo anterior sería el desarrollo de robots cooperativos para la batimetría. Pero aun así, el ASC ARTEMIS no podía operar bajo circunstancias más severas que las encontradas en el río Charles, donde se llevaban a cabo los test de esta embarcación.

## 2.3 SCOUT

Por otro lado un grupo de investigación utiliza SCOUT's (Surface Craft for Oceanographic and Undersea Testing - Embarcaciones de Superficie para Submarinos y Pruebas Oceanográficas) para desarrollar una plataforma de superficie de bajo costo para la investigación de cooperatividad autónoma; los vehículos fueron desarrollados por ingenieros del MIT del Departamento de

---

<sup>52</sup>Ibid., p. 83.

Ingeniería del Océano. “Los objetivos del diseño incluyeron simplicidad, robustez, versatilidad y una mayor utilidad operacional.”<sup>53</sup>

“El vehículo SCOUT consiste de una sencilla estructura de un kayak (Figura 15) hecho de HDPE (Polietileno de Alta Densidad) que ha sido modificado para permitir la propulsión y un control autónomo utilizando una tarjeta única de computador a bordo. El peso total del sistema con baterías instaladas es de aproximadamente 180 Lbs lo que permite que el vehículo sea transportado y levantado por dos personas fácilmente.”<sup>54</sup>

Figura 15. Diseño Kayak del SCOUT



Fuente: SCOUT — A Low Cost Autonomous Surface Platform for Research in Cooperative Autonomy

## 2.4 ACES

Debido a esto, Justin E. Manley busco mejorar ese diseño para tener mayor velocidad, más capacidad de carga y más resistencia, mejorando en si su comportamiento en el mar, este diseño es el ACES (Autonomous Coastal

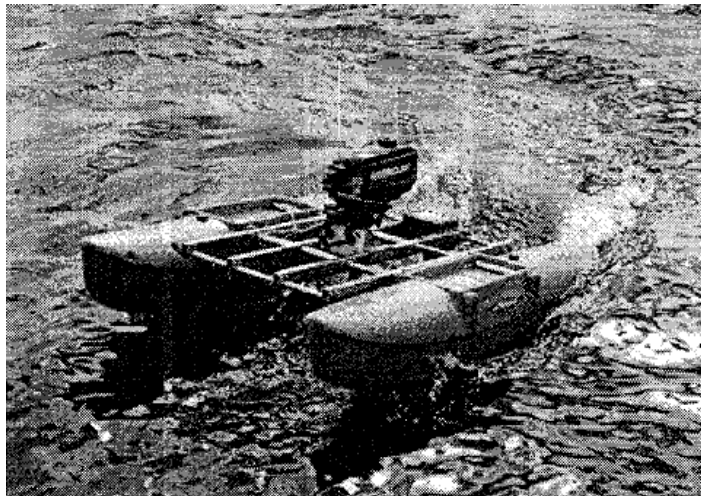
---

<sup>53</sup>CURCIO Joseph, LEONARD John, and PATRIKALAKIS Andrew. SCOUT — A Low Cost Autonomous Surface Platform for Research in Cooperative Autonomy. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. p. 1.

<sup>54</sup>Ibid., p. 2.

Exploration System - Sistema Autónomo de Exploración Costera) como él lo describe “empieza por la tarea de escoger una nueva estructura, y realiza una prueba con un pequeño kayak el cual se endereza automáticamente al volcarse, este bote provee una robustez suficiente para muchos estados del mar pero no proporciona la estabilidad necesaria”<sup>55</sup> según Manley, para realizar estudios de batimetría por lo que se descarta para ser usado, y decide escoger la estructura de un catamarán para ACES (Figura 16), el nuevo ASC ARTEMIS, ya que según su investigación “el área amplia de flotación de los catamarán reduce los movimientos ondulantes y aumenta el desplazamiento sin el problema significativo de lastre que experimentaría una embarcación de tamaño similar”<sup>56</sup>.

Figura 16. Estructura catamarán del robot ACES.



Fuente: Development of the autonomous surface craft “ACES”.

## 2.5 INTEGRACIÓN DEL ESTUDIO PREVIO

Como lo menciona Massimo Caccia los investigadores se han dado cuenta que para los tipos de trabajos de batimetría es necesario un diseño catamarán, el cual

---

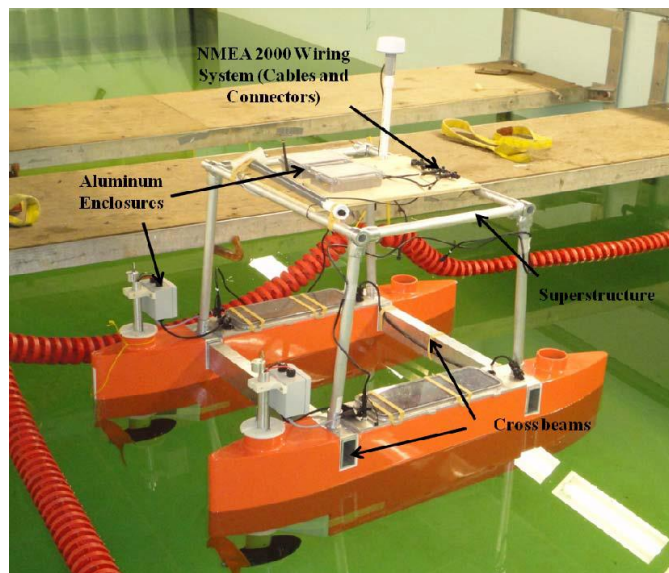
<sup>55</sup> MANLEY Justin E., Development of the autonomous surface craft “ACES”. Department of Ocean Engineering. 1997. p. 828.

<sup>56</sup> Ibid., p. 828.

se ha visto que es “más estable que las demás embarcaciones, tiene una gran capacidad de carga y redundancia en la flotación del casco”<sup>57</sup>, pues este diseño tiene dos cascos unidos por un marco, lo que le da sus ventajas.

Respaldao lo anterior, el trabajo de Zhi Li y Ralf Bachmayer quienes pretendían crear un “vehículo autónomo y robusto de superficie que funcionara en un ambiente hostil como el océano”<sup>58</sup>, para su investigación tienen en cuenta el prototipo hecho por el MIT en 1993, el ASC ARTEMIS, quienes diseñan la réplica de un arrastrero o barco de arrastre y que fue usado para validación de la navegabilidad y la arquitectura del sistema de control. Después de esto, ellos diseñaron un catamarán el cual demostró mejor estabilidad, durante una muestra batimétrica, que el prototipo del rastroero hecho anteriormente a escala 1/17, debido a la estructura redundante con la que está construido, como lo muestra la figura 17.

Figura 17. Catamarán simple ASC ARTEMIS.



Fuente: The Development of a Robust Autonomous Surface Craft for Deployment in Harsh. Ocean Environment

---

<sup>57</sup> CACCIA Massimo. Autonomous Surface Craft: prototypes and basic research issues. p. 1.

<sup>58</sup> LI Zhi, BACHMAYER Ralf. The Development of a Robust Autonomous Surface Craft for Deployment in Harsh. Ocean Environment. p. 1.

Este tipo de embarcaciones pueden ser propulsados por tres medios: vela, motor eléctrico o motor de combustión interna, para las necesidades de Manley “el viento fue eliminado debido a la complejidad para mover de forma autónoma las velas que daban la dirección al barco y además ese tipo de propulsión requeriría de todas formas otra fuente de energía para los instrumentos y actuadores; descarta el motor eléctrico debido al peso del ASC con el sistema de baterías que limitaría el movimiento del barco; Por esto, el motor de combustión se escoge para el movimiento del ASC”<sup>59</sup>. Aunque en un trabajo futuro para mejorar el ASC ARTEMIS como lo publica Zhi Li y Ralf Bachmayer, Manley “cambia el sistema de propulsión de un motor a combustión por un motor eléctrico para lograr mejor control de las hélices”<sup>60</sup>, pues mejora la maniobrabilidad del vehículo, por lo que para este tipo de proyectos es más efectivo y eficiente.

Después de comparar con otras investigaciones y prototipos, Zhi Li y Ralf Bachmayer deciden escoger el catamarán por su estabilidad, por lo cual se considera un modelo de barco robusto y hasta fácil de construir si se quiere. La estabilidad del bote en un cuerpo de agua es un logro importante cuando se trata de realizar maniobras rápidas o en caso de tener escarceo o movimiento en la superficie del mar.

Por otro lado, para el equipo de investigación de Valada<sup>61</sup> y Scerri<sup>62</sup> es preciso utilizar un hidrodensizador. Los dos trabajos coinciden en esto debido a que el motor de estas embarcaciones está sobre el bote y no debajo como se observa en las imágenes de la figura 18. Lo que permite ser utilizado en pantanos, cuerpos de agua poco profundos y en ecosistemas frágiles, ya que no tiene ningún elemento por debajo del bote que ponga en peligro la integridad de éste, como pasaría con los vehículos que tienen el motor de propulsión bajo el agua en caso de enredarse con la vegetación o estancarse debido a la profundidad. Sin embargo, como el motor está sobre el nivel del agua en la parte trasera de la embarcación, podría existir algún accidente al acercarse a las hélices, pero esto se logra impedir al instalar una malla de protección.

---

<sup>59</sup>MANLEY. Op. Cit., p. 829.

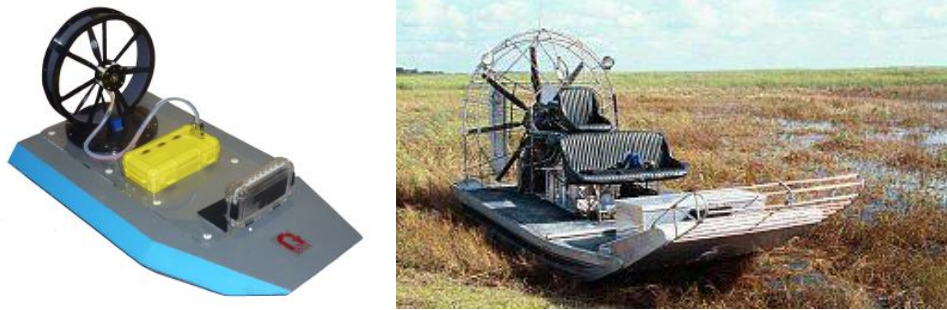
<sup>60</sup>MANLEY J, MARSH A, CONFORTH W, and WISEMAN J. Evolution of the Autonomous Surface Craft AutoCat. Citado por Zhi Li, Ralf Bachmayer. The Development of a Robust Autonomous Surface Craft for Deployment in Harsh. p. 1.

<sup>61</sup>A. Valada, P. Velagapudi, B. Kannan, C. Tomaszewski, G. Kantor, and P. Scerri. Development of a Low Cost Multi-Robot Autonomous Marine Surface Platform,

<sup>62</sup> Paul Scerri, Prasanna Velagapudi, Balajee Kannan, Abhinav Valada, Christopher Tomaszewski, John Dolan, Adrian Scerri, Kumar Shaurya Shankar, Luis Bill and George Kantor. Real-World Testing of a Multi-Robot Team.



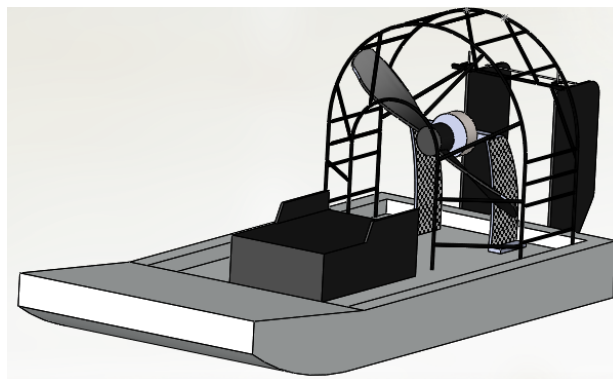
Figura 18. Hidrodeslizador utilizado por Scerri<sup>63</sup> e hidrodeslizador de pantano.



Fuente: Real-World Testing of a Multi-Robot Team.

Teniendo en cuenta los diseños de prototipos citados anteriormente, se escogerá la estructura de un hidrodeslizador para el proyecto debido a la buena estabilidad y maniobrabilidad que tiene, por lo que permitirá recolectar los objetos que se encuentran en el cuerpo de agua sin importar su profundidad además de ser más asequible su compra. La figura 19 muestra el diseño 3D realizado en SolidWorks®

Figura 19. Diseño en SolidWorks® del Hidrodeslizador a utilizar.



Fuente: Propia del autor.

---

<sup>63</sup>Ibid., p. 1.

A continuación se presenta la tabla 1, comparativa de los trabajos destacados con las ventajas y desventajas que permite detallar la elección del hidrodreslizador.

Tabla 1. Comparativo de estructuras utilizadas.

<b>Estructura</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Arrastrero a escala	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mediano</li> <li>- Menor costo de operación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dificil maniobrabilidad</li> <li>- Dificil conseguir a escala</li> </ul>
Kayak	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pequeño</li> <li>- Liviano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No tiene la estabilidad necesaria</li> <li>- No tiene motor.</li> </ul>
Hidrodreslizador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pequeño</li> <li>- Liviano</li> <li>- Estable</li> <li>- Asequible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ninguna notable.</li> </ul>
Catamarán	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pequeño</li> <li>- Liviano</li> <li>- Estable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mas caro que el hidrodreslizador</li> </ul>

Fuente: Propia del autor.

## 2.6 ESTUDIO DE FLOTABILIDAD

La flotabilidad es la capacidad que tiene un cuerpo de mantenerse dentro de un fluido, esta propiedad depende de las fuerzas que actúan en el mismo y el sentido que tienen. La flotabilidad será positiva cuando el cuerpo tienda a ascender dentro del fluido, en cambio, será negativa si el cuerpo, tiende a descender en el fluido en cuestión. De otro modo, será neutra, cuando el cuerpo se mantenga en suspensión dentro del fluido.

Además, el término flotabilidad se encuentra estrechamente vinculado con el concepto de flotación de un cuerpo. Un cuerpo se encontrará en estado de flotación cuando permanezca suspendido en un entorno líquido o gaseoso, o sea, en un fluido y siempre que el número de partículas que componen al objeto sea menor al número de partículas del fluido desplazadas.

El principio de Arquímedes explica la naturaleza de la flotabilidad: "Un cuerpo sumergido total o parcialmente en un líquido experimenta una fuerza ascendente igual al peso del líquido desplazado".

Para hacer más clara la anterior afirmación, a continuación se presenta la ecuación 1 de Arquímedes.

$$F = (\rho_f - \rho_s)Vg \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde  $\rho_f$  es la densidad del fluido,  $\rho_s$  densidad del sólido, V el volumen del sólido y g la aceleración de la gravedad.

Para el caso del proyecto que el fluido donde se recogerán los objetos será agua, por tanto  $\rho_f = 1 \text{ g/cm}^3$ .

Teniendo en cuenta que la densidad es igual a masa sobre volumen,  $\rho = \frac{m}{V}$ , es necesario que la masa no exceda o iguale en magnitud el volumen del sólido, en este caso del hidrodreslizador para que la fuerza de empuje sea siempre positiva, lo que quiere decir que no se hundirá.

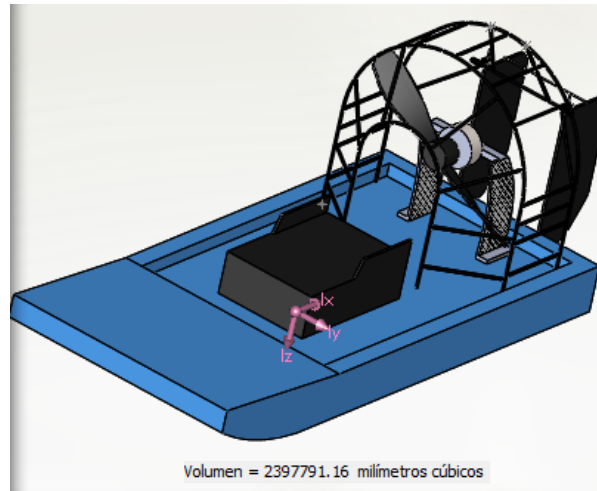
Es decir que si la base del hidrodreslizador tiene un Volumen de  $2397,791 \text{ cm}^3 \approx 2397,8 \text{ cm}^3$  de acuerdo al cálculo de SolidWorks® (Figura 20) y la masa es de 640g según especificaciones del fabricante, reemplazando en la fórmula de Arquímedes será:

$$F = \left( 1 \text{ g/cm}^3 - \frac{640 \text{ g}}{2397,8 \text{ cm}^3} \right) 2397,8 \text{ cm}^3 * 980 \text{ cm/s}^2$$

$$F = (1 \text{ g/cm}^3 - 0,26 \text{ g/cm}^3) 2349844 \text{ cm}^4/\text{s}^2$$

$$F = 1738884,56 \text{ g} * \text{cm}/\text{s}^2 = 17,38 \text{ N}$$

Figura 20. Volumen de la base del hidrodslizador calculado mediante SolidWorks®



Fuente: Propia del autor.

Debido a que la fuerza es positiva, el hidrodslizador flotará sin problema en esas condiciones. De acuerdo con esto, se puede analizar matemáticamente el valor máximo de masa para la embarcación antes de empezar a hundirse por la misma.

Se debe tener claro que para que la fuerza de empuje sea positiva, la resta entre densidades (Fluido y sólido) debe ser positiva.

En la ecuación 1 de Arquímedes, la densidad del fluido siempre será la misma ya que se trabajara siempre en agua, por lo que la variable será la densidad de la embarcación, y a su vez esta densidad tendrá una sola variable, la masa, ya que el volumen no cambiara. Así pues teniendo en cuenta la ecuación 2 que viene de la ecuación de Arquímedes, cuando la masa  $m_s$  alcance el mismo valor en magnitud del volumen  $V_s$ , la resta entre densidades será cero, y por consiguiente el cuerpo flotara pero sujeto a cambios muy leves de movimiento en la embarcación, lo que fácilmente podría causar el hundimiento de ésta. Ahora, si el valor de la masa supera en magnitud el volumen del sólido, la resta resultara negativa con lo que es de esperarse que el hidrodslizador se hunda.

$$F = (1 \frac{g}{cm^3} - \frac{m_s}{V_s}) V g \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Para evitar este tipo de situaciones se calculara la masa que la embarcación podría soportar. Ya que el volumen es  $2397,8\text{cm}^3$  este será el valor máximo que podrá alcanzar la masa del hidrodreslizador, es decir 2397,8 g. Para evitar inconvenientes se calculara un 20% por debajo del valor máximo, para tener un factor de seguridad que asegure la flotabilidad del hidrodreslizador.

Por lo anterior el valor máximo que podrá alcanzar la masa de la embarcación será 1918,24 g para permanecer a flote.

Ya que se necesita agregar diferentes componentes para realizar tareas de localización, comunicación, ubicación, orientación y navegación, se tendrá en cuenta el peso de cada uno de estos elementos pues irán sobre el vehículo. Todos los datos fueron tomados de la ficha técnica del fabricante. En la tabla 2 se muestran los pesos de los elementos que la embarcación debe llevar.

Tabla 2. Masa de los componentes del robot.

Dispositivo	Peso (gr)
Tarjeta STM32F4DISCOVERY	60
Sensor infrarrojo SHARP	1,4
Módulo GPS	14,4
XBee	4,5
Micro-interruptor	0,07
Tarjeta de potencia 20A ESC 3A UBEC	30
Batería plomo ácido	300
Batería Li-Po	188
Cableado	20 (Aproximado)
<b>Total:</b>	<b>618,37</b>

Fuente: Propia del autor.

Debido a que este peso se debe tener en cuenta para la flotabilidad, se sumaran los 618,37 gr de los componentes con los 640 gr del peso de la embarcación, con lo cual se tiene un valor de 1258,37 gr aproximadamente.

## 2.7 ESTRUCTURA PARA LA RECOLECCIÓN DE OBJETOS

Ya que es necesario adaptar una estructura para que la embarcación pueda recolectar los objetos flotantes en el cuerpo de agua, es necesario limitar su peso debido a la flotabilidad que debe tener el hidrodreslizador. Siendo así, se resta los 1258,37 gr de la suma de componentes y estructura como tal a los 1918,24 gr que se habían definido como límite, es decir que la estructura de recolección de objetos no podrá superar 659,87gr.

Teniendo en cuenta el documento de Miriam Gordon, del California Coastal Commission y Ruth Zamist, Plastic Debris, Rivers to Sea Project que habla sobre las mejores prácticas de gestión para controlar la basura y los escombros de las aguas pluviales y los desagües, se deduce que la mayoría de las estrategias utilizan una red localizada en un sitio estratégico y así poder coleccionar o filtrar el material basura que se encuentra en el agua. Un ejemplo claro de esto es el CATCH BASIN OPENING SCREEN COVER que consiste en la tapa de un sumidero perforada diseñada para encajar fuera de los colectores de las aguas pluviales. Pueden o no ser estructuras manualmente reinstalables. El servicio de aseo diario es necesario para mantener estos sumideros limpios evitando que se obstruyan o tapen<sup>64</sup>. Estas mallas (figura 21) son ideales pues al estar perforadas permiten el paso del agua más no de los materiales que excedan el tamaño de sus orificios, es decir que la mayoría de desechos no pasaran este filtro.

Figura 21. Malla en espacio público.



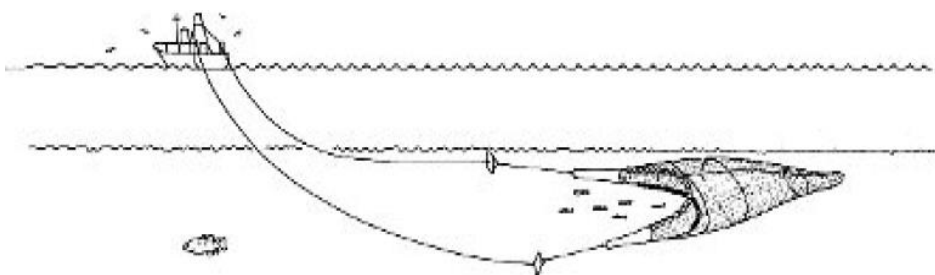
Fuente: MUNICIPAL BEST MANAGEMENT PRACTICES FOR CONTROLLING TRASH AND DEBRIS IN STORMWATER AND URBAN RUNOFF.

---

<sup>64</sup> Gordon Miriam, Ruth Zamist, MUNICIPAL BEST MANAGEMENT PRACTICES FOR CONTROLLING TRASH AND DEBRIS IN STORMWATER AND URBAN RUNOFF, p, 10.

Para diseñar dicha estructura se tendrá en cuenta el arte de arrastre, una forma industrial de pesca, la cual muchas organizaciones tildan de ser devastadora para el ecosistema marino donde se practica. La pesca de arrastre es el método menos selectivo que existe, además de ser el más perjudicial para los fondos marinos. Consiste en una red en forma de cono o calcetín que se remolca desde una embarcación manteniéndola abierta como la imagen de la figura 22. De esta forma, todo lo que encuentra a su paso queda atrapado en el interior de la red<sup>65</sup>. La única discriminación la hacen según el tamaño de la malla del aparejo.

Figura 22. Pesca de arrastre.



Fuente: GREENPEACE. La pesca de arrastre.

### 2.7.1 Descripción

Con base en este método se realizará la estructura que recoja los elementos flotantes, que en su mayoría podrían ser basura, así como botellas, empaques, envases, etc. Utilizando una estructura con una malla que se sumerge sólo lo suficiente para capturar dichos materiales. Cabe aclarar que al no sumergir sustancialmente la malla, los organismos y el ecosistema no resultarán afectados, pues el proyecto apunta a materiales en la superficie del cuerpo de agua.

La estructura consistirá en dos columnas soportadas en la mitad del hidrodreslizador que soportaran un perfil en L sobre ellas, de este perfil se sostendrán dos laminas a cada lado separadas entre ellas a 121 mm para darle espacio a la red o malla que arrastrará los elementos encontrados, como se ve en

---

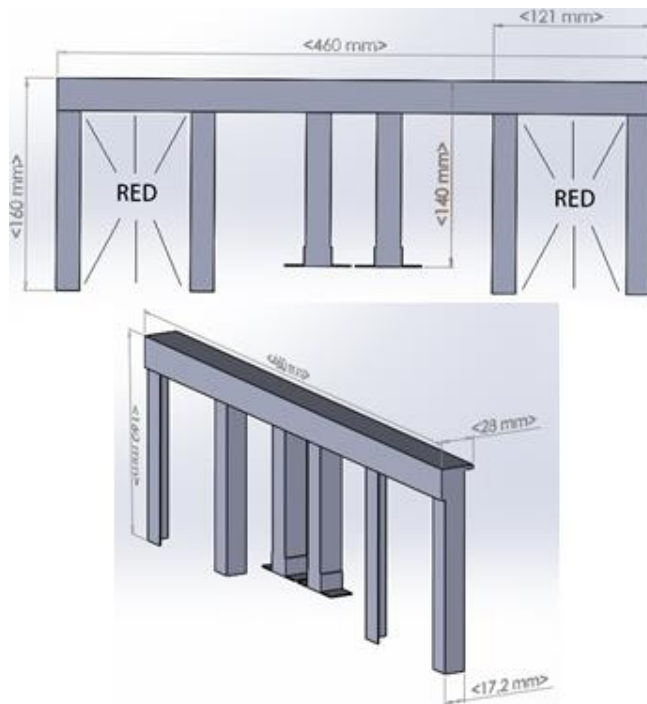
<sup>65</sup> GREENPEACE. LA PESCA DE ARRASTRE, [www.greenpeace.org/espana/Global/espana/.../Qué\\_es\\_pesca\\_arrastre.pdf](http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/.../Qué_es_pesca_arrastre.pdf) p. 1.

la figura 23. Ya que el sistema es cooperativo, el armazón tendrá un arreglo de imanes en la parte superior para que la estructura del otro robot pueda acoplarse, y puedan realizar la recolección.

Se usan dos robots para transportar los objetos flotantes ya que se ayudan mutuamente para no desviarse del camino en caso que el peso de los objetos los desvíe, lo cual ocurriría si solamente un robot los transportara. Es decir que cada robot busca apoyarse en el otro obteniendo aquello que le hace falta y convergiendo en un mismo objetivo. Además al ser dos robots hay más espacio para transportar mayor cantidad de objetos al acoplarse las estructuras mediante los imanes.

Teniendo en cuenta la restricción de peso que se tiene en el diseño de la estructura, se elige el aluminio por su peso y resistencia. Este material tiene una densidad de aproximadamente  $2,7 \text{ g/cm}^3$  con lo que cumpliría la restricción de peso calculado, ya que de acuerdo al diseño en SolidWorks® la estructura tiene un volumen de 114,59 centímetros cúbicos, lo que equivale a una masa teórica de 309,40 g

Figura 23. Cotas del sistema de arrastre.



Fuente: Propia del autor.



### 2.7.2 Construcción

Al tener el diseño en SolidWorks® se procede a realizar la estructura en físico, a continuación se mostrara algunos pasos para evidenciar la construcción de esta.

Las columnas resistirán la estructura transversal que llevara las mallas para la recolección, como se aprecia en la siguiente figura 24.

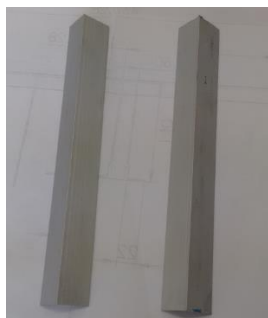
Figura 24. Columnas de aluminio en perfiles cuadrados.



Fuente: Propia del autor.

Las demas partes de la estructura son perfiles en L de aluminio. El perfil horizontal es el mas largo con 26 cm, y los perfiles verticales de 16,0 cm que se observan en la figura 25.

Figura 25. Perfil vertical en L de 16 cm.



Fuente: Propia del autor

Para unir los perfiles de aluminio se utilizan remaches, los cuales son resistentes, económicos y fáciles de instalar. Figura 26 y 27.

Figura 26. Estructura en construcción.



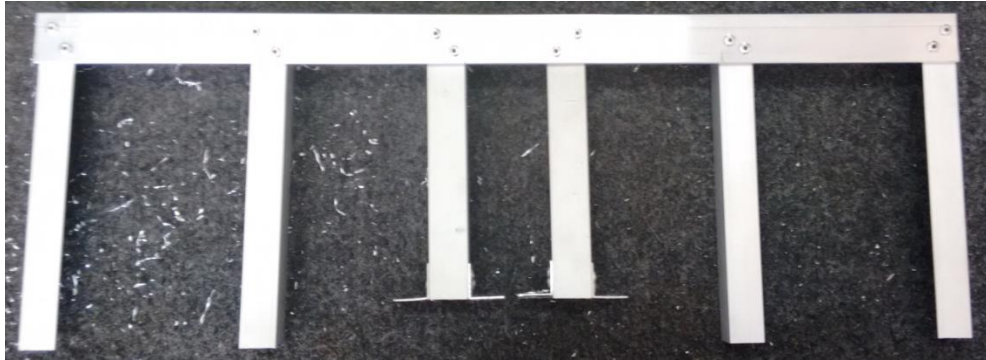
Fuente: Propia del autor

Figura 27. Estructura en construcción, instalando remaches.



Fuente: Propia del autor.

Figura 28. Estructura terminada.



Fuente: Propia del autor.

Una vez construida la estructura (Figura 28), se procede a instalar la malla que ayudara a arrastrar los elementos recogidos. La malla está hecha de polietileno y poliestireno que forman un plástico rígido para evitar que algunos residuos la desgasten fácilmente (Figura 29). Ira a cada lado de la embarcación para recoger más residuos, además para permitir que otro robot cooperativo pueda llegar por cualquiera de los lados para ayudarle con la recolección y así realizar el procedimiento más rápido y con más alcance. En la figura 30 se puede observar la estructura finalizada.

Figura 29. Malla de poliuretano rígido.



Fuente: Propia del autor.

Figura 30. Estructura de arrastre.

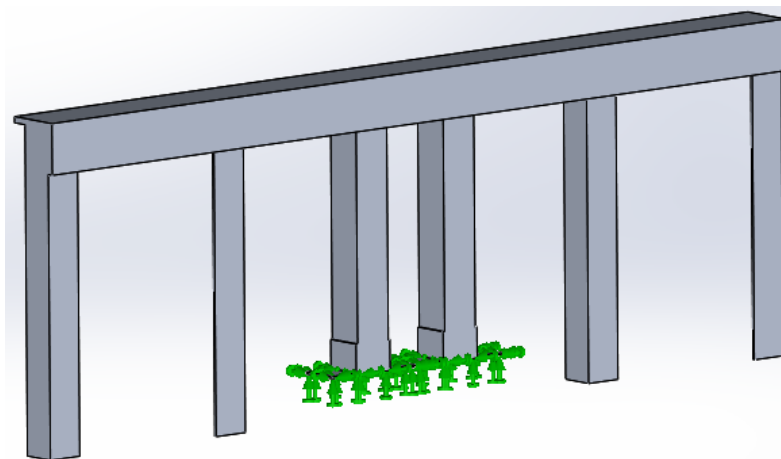


Fuente: Propia del autor.

### 2.7.3 Análisis de la estructura

Al tener la pieza en SolidWorks® se realiza el análisis de tensiones con ayuda de SimulationXpress para verificar si la pieza resistirá las fuerzas que puedan generar los objetos en la superficie del agua. En principio se escogen sujeciones de la pieza, las cuales irán en la base de las columnas como lo ilustra la figura 31, pues de ahí se unirán al hidrodreslizador.

Figura 31. Sujeción de la estructura.



Fuente: Propia del autor.

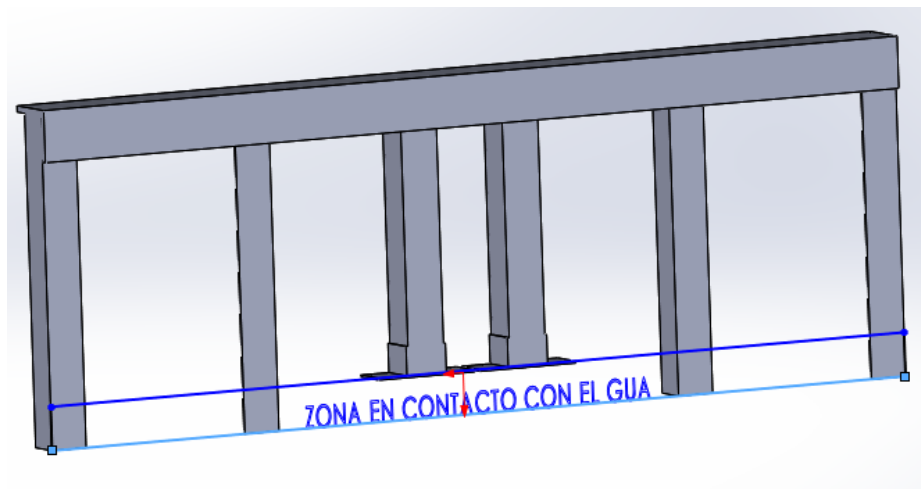
Luego se define la dirección y valor de las fuerzas, así como los elementos en los que se aplicara. El valor de la fuerza dada por la ecuación 3 en cada elemento se define como 3,0 N, ya que se estima una masa de 1 Kg y la aceleración del robot es de 3 m/s<sup>2</sup>.

$$F = m * a \quad \text{[Ecuación 3]}$$

$$F = 1 \text{ Kg} * 3 \text{ m/s}^2 \quad F = 3 \text{ N}$$

Además, ya que una pequeña parte estará en contacto con el agua (figura 32), se calcula la fuerza que ejercerá ésta sobre la estructura para tenerla en cuenta en el análisis de fuerzas.

Figura 32. Superficie de la estructura en contacto con el agua.



Fuente: Propia del autor.

Para calcular la fuerza se debe saber la masa de agua que estará en contacto con la superficie de la estructura, así que sabiendo la densidad del líquido se puede obtener dicha variable. El volumen de agua que estará ejerciendo la fuerza en cada elemento de la estructura será de 0,0000182 m<sup>3</sup>, que es reemplazado en la ecuación 4 así:

$$m_{agua} = \rho * V \quad \text{[Ecuación 4]}$$

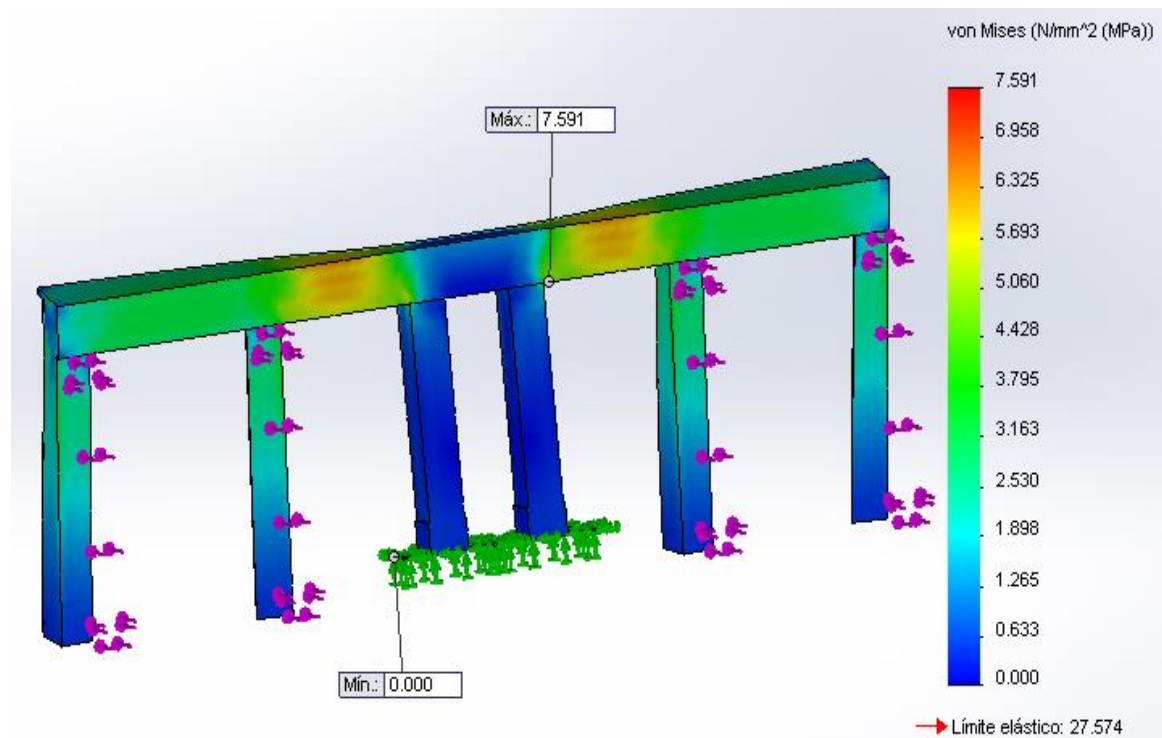
$$m_{agua} = 1000 \text{ Kg}/\text{m}^3 * 0,0000182 \text{ m}^3 = 0,0182 \text{ Kg}$$

Lo que quiere decir que el agua en contacto con la estructura ejercerá una fuerza de:

$$F = 0,0182 \text{ Kg} * 3 \text{ m}/\text{s}^2 = 0,05 \text{ N}$$

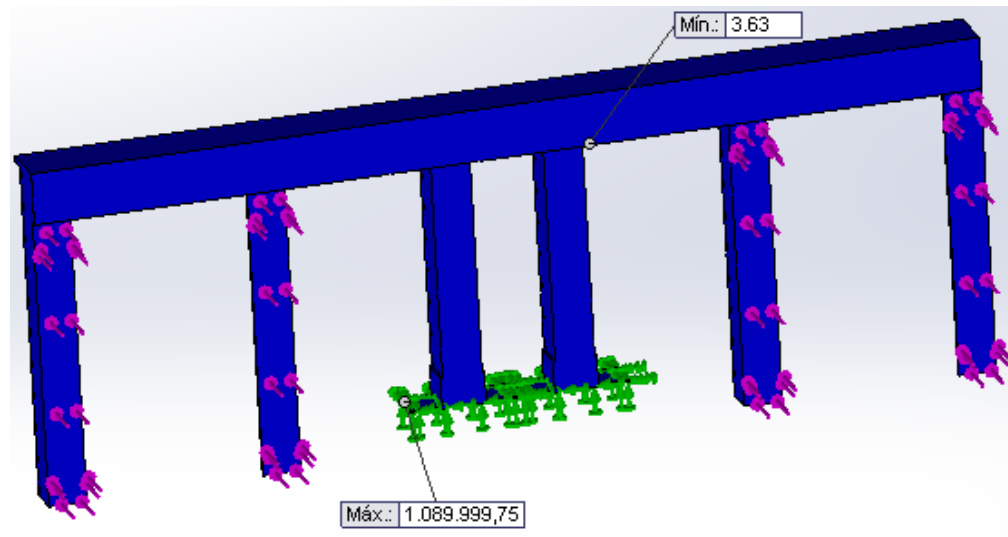
Teniendo estos resultados, se suma la fuerza que ejerce el agua y los elementos que arrastrara la estructura y se realiza el análisis con una fuerza de 3,05 N donde se evidencia que la estructura no sufre tensión crítica (figura 33) y está lejos de alcanzar el límite elástico del material, lo que quiere decir que la carga de 1 Kg por columna o sustentáculo (2 Kg por red) no representa peligro de deformación para la estructura de arrastre, pues el valor más crítico se encuentra en 7,59 MPa y el límite elástico del material es de 27,57 MPa, lo que significa un factor de seguridad de 3,63 como lo muestra la figura 34.

Figura 33. Tensión de Von Mises.



Fuente: Propia del autor.

Figura 34. Factor de seguridad máximo y mínimo.



Fuente: Propia del autor.

#### 2.7.4 Resultado del estudio

A continuación se presentan los valores teóricos de la estructura. Las tablas 3, 4, 5, 6 y 7 son tomadas del informe generado por el programa SolidWorks® al realizar el análisis.

Tabla 3. Características de la estructura.

Nombre del modelo: Estructura de arrastre final Configuración actual: Predeterminado			
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Saliente-Extruir14	Sólido	Masa:0.309417 kg Volumen:0.000114599 m <sup>3</sup> Densidad:2700 kg/m <sup>3</sup> Peso:3.03228 N	D:\TESIS ESTRUCTURA\Estructura viga final.SLDPRT Oct 17 12:22:20 2015

Fuente: Informe generado por Solidworks® -SimulationXpress Study-.

Las propiedades del material escogido para la estructura.

Tabla 4. Propiedades del material.

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: Aleación 1060 Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión máxima de von Mises Límite elástico: 27.5742 N/mm <sup>2</sup> Límite de tracción: 68.9356 N/mm <sup>2</sup>	Sólido 1(Saliente-Extruir14)(Estructura viga final)

Fuente: Informe generado por Solidworks® -SimulationXpress Study-.



Los resultados de tensión, desplazamiento y factor de seguridad.

Tabla 5. Tensión generada.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Stress	VON: Tensión de von Mises	2.52974e-005 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Nodo: 7097	7.59053 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Nodo: 16234
Estructura viga final-SimulationXpress Study-Tensiones-Stress			

Fuente: Informe generado por Solidworks® -SimulationXpress Study-.

Tabla 6. Desplazamiento generado.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Displacement	URES: Desplazamiento resultante	0 mm Nodo: 885	0.973953 mm Nodo: 2448
Estructura viga final-SimulationXpress Study-Desplazamientos-Displacement			

Fuente: Informe generado por Solidworks® -SimulationXpress Study-.

Tabla 7. Factor de seguridad.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor of Safety	Tensión de von Mises máx.	3.63271 Nodo: 16234	1.09e+006 Nodo: 7097
Estructura viga final-SimulationXpress Study-Factor de seguridad-Factor of Safety			

Fuente: Informe generado por Solidworks® -SimulationXpress Study-.

### **3. CAPITULO. METODOLOGIA DE COOPERACION**

#### **3.1 INTRODUCCION**

La construcción de una metodología de cooperación se basa en dividir el objetivo global en partes que en conjunto permitan lograrlo. También se deben tener en cuenta las características de los individuos que interactuarán entre sí para lograr el objetivo global o tarea. En la construcción o selección de una metodología para un grupo de robots cooperativos es recomendado dar un vistazo al comportamiento de las manadas, colonias, cardúmenes o bandadas de animales que poseen y usan una metodología de cooperación para realizar una tarea.

#### **3.2 METODOLOGÍA DE COOPERACIÓN EN LA NATURALEZA**

Según Martínez y Oteros<sup>66</sup>, en su escrito sobre el origen y evolución humana, basado en cooperación versus competencia, se hace un cuestionamiento acerca del comienzo de la vida en la tierra y se propone la solución más aceptada donde se toma como referencia a Aleksandr Oparin y su teoría de la evolución de las moléculas orgánicas, donde posteriormente, según la Teoría Endosimbionte, surgen las células eucariontes por asociación cooperativa entre bacterias. Por lo tanto, concluyen que ningún organismo viviente es independiente, formando parte de una red de interacciones tróficas, es decir que los organismos existentes han sobrevivido gracias a la interacción. La naturaleza ha adoptado una metodología de cooperación en pro de la supervivencia y evolución conjunta de las especies.

##### **3.2.1 Selección grupo heterogéneo o homogéneo**

Charles Darwin, uno de los evolucionistas más importantes y famosos del mundo, afirmó en su libro Origen del hombre, que bastantes sociedades de animales eliminan la lucha por la existencia entre los individuos. En lugar de la lucha, aparece la cooperación, que produce el desarrollo de las facultades intelectuales y de las cualidades morales, y que asegura a tal especie las mejores

---

<sup>66</sup> MARTÍNEZ, Irene y OTEROS, Elisa. Origen y evolución humana. Cooperación vs. Competencia. [en línea]. 2005. [consultado 26 de Enero de 2016]. p. 1-17. Disponible en: <<http://www.somosbacteriasyvirus.com/cooperacion.pdf>>.

oportunidades de vivir y propagarse, sin importar que sean más fuertes, astutos o hábiles<sup>67</sup>.

Adnan Oktar ha descrito distintos comportamientos cooperativos de diferentes especies de animales en su libro EL CARÍO ENTRE LOS ANIMALES REVELA LA OBRA DE DIOS. El cooperativismo está presente en manadas, colonias, cardúmenes o bandadas de las mismas especies o entre diferentes especies (grupo homogéneo y heterogéneo respectivamente) y cumplen tareas de vigilancia, defensa, limpieza, recolección de alimento, crianza y protección de descendientes, entre muchas más<sup>68</sup>.

Un ejemplo de cooperativismo animal entre dos especies diferentes se presenta en el libro de Oktar, donde describe que en un safari en África occidental, el científico Kenneth Walter encontraba a menudo jirafas y elefantes haciéndose compañía. Walter describe que éste comportamiento les ayuda a las dos especies ya que los elefantes tienen una excelente audición, pero poca visión, y las jirafas tienen una vista más amplia y mejor debido a su altura<sup>69</sup>. El cooperativismo ocurre cuando hay un intercambio de capacidades o habilidades que permiten fortalecer las debilidades de ambos. Entonces, Walter concluye que es casi imposible acercarse sin ser vistos u oídos.

Normalmente, la metodología de cooperación presente en grupos heterogéneos, está compuesta de metodologías de cooperación de cada grupo homogéneo que la conforman. Para el ejemplo de las jirafas y los elefantes, se tiene la metodología de cooperación que se presenta en la figura 35.

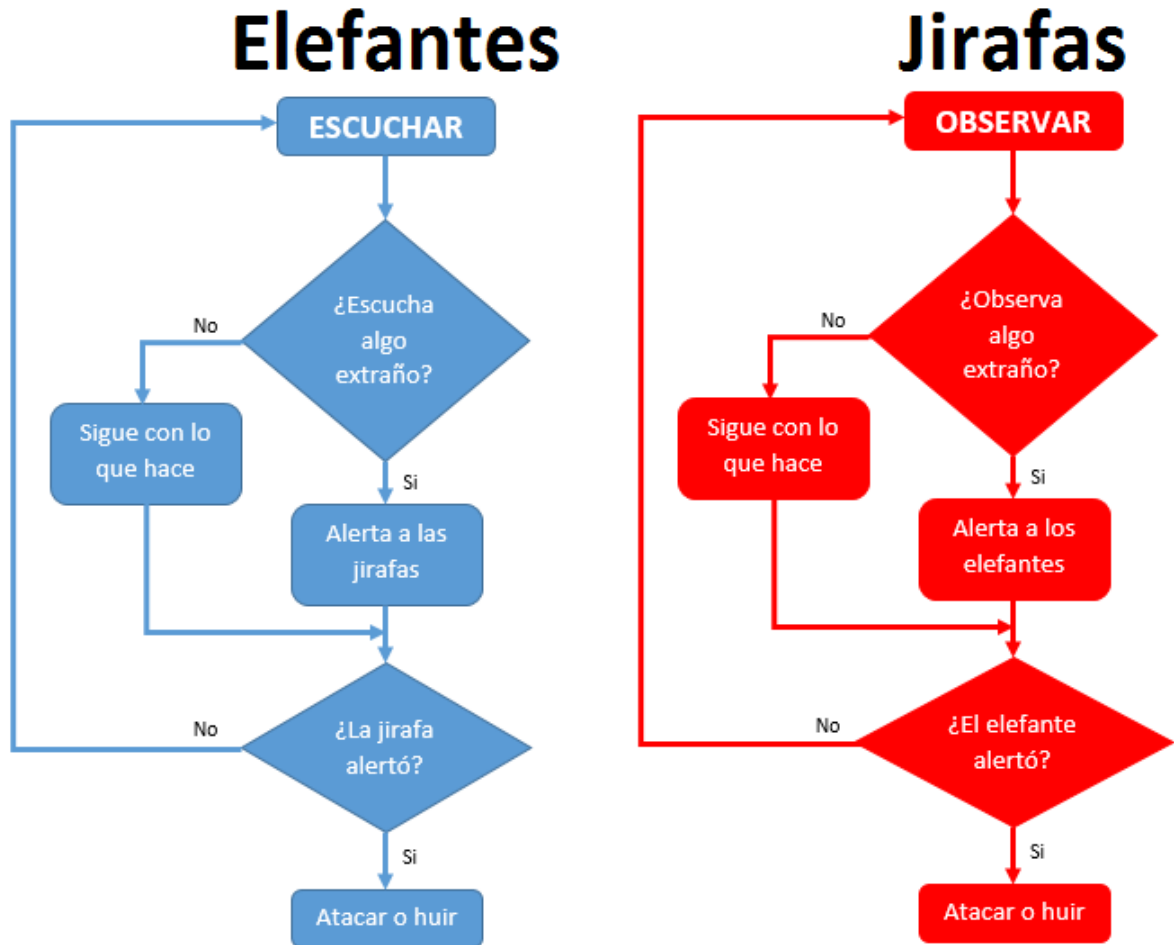
---

<sup>67</sup> DARWIN, Charles. El origen del hombre. Citado por MARTÍNEZ, Irene y OTEROS, Elisa. Origen y evolución humana. Cooperación vs. Competencia. [en línea]. 2005. [consultado 26 de Enero de 2016]. p. 14. Disponible en: <<http://www.somosbacteriasyvirus.com/cooperacion.pdf>>.

<sup>68</sup> OKTAR, Adnan. EL CARÍO ENTRE LOS ANIMALES REVELA LA OBRA DE DIOS. A9 GROUP. 175 p.

<sup>69</sup> Ibid., p. 117.

Figura 35. Metodología de cooperación de jirafas y elefantes.



Fuente: Propia del autor.

Otro ejemplo de cooperativismo presentado en el libro de Oktar pero de una misma especie, es la defensa grupal de los delfines contra los tiburones. Oktar describe que si algún tiburón se acerca demasiado a las crías, dos delfines adultos se separan para atraer su atención. Cuando consiguen que el tiburón se aparte de su objetivo, el resto del cardumen lo rodea para golpearle las agallas hasta

ahogarlo<sup>70</sup>. En la figura 36 se presenta la metodología de cooperación usada por los delfines para cuidar de sus descendientes.

Figura 36. Metodología de cooperación de delfines.



Fuente: Propia del autor.

---

<sup>70</sup> Ibid., p. 122.

De los ejemplos anteriores se concluye que la metodología de cooperación en las especies homogéneas puede llegar a ser más eficiente, flexible y robusta ya que los individuos tienen las mismas capacidades y características, es decir que atienden rápidamente las alertas ya que cualquiera puede ejecutar las subtareas para alcanzar el objetivo global o tarea, que en el ejemplo de los delfines es cuidar las crías del cardumen. Se decide enfocar la metodología de cooperación para un grupo homogéneo de robots capaces de recolectar objetos.

### **3.2.2 Selección de la metodología de cooperación**

Como la tarea del grupo de prototipos de robots acuáticos no sumergibles es recolectar objetos flotantes, se decide comparar la metodología usada por algunos pájaros africanos, y la metodología usada por las hormigas, ambas para la búsqueda y recolección de alimento. Los grupos de individuos de ambas especies que desempeñan la tarea son homogéneos, por lo tanto se ajusta al criterio del tipo de grupo de robots del proyecto.

El primer ejemplo de una metodología de recolección es la de los pájaros africanos. Las bandadas de pájaros se alimentan principalmente de los frutos que se encuentran en los extremos de las ramas de los árboles, pero no todos pueden alimentarse ya que no hay suficiente espacio. Sin embargo, quienes estén más cerca del alimento, lo pasan a sus compañeros para que todos coman por igual<sup>71</sup>. La bandada se ubica alineada en la rama para recolectar y transportar los frutos pájaro a pájaro, como se ve en la figura 37, lo que podría ser usado en una tarea de recolección de objetos flotantes. La tarea es dividida en cuatro subtareas: la búsqueda, el aviso, la formación y el transporte e ingesta de alimento. La búsqueda es efectuada por cada pájaro hasta que alguno encuentre suficiente alimento para la bandada. Luego, avisa a sus compañeros para que se dirijan al árbol para posteriormente ejecutar la tarea de formación. Es ésta, cada pájaro se ubica sobre la rama donde están los frutos formando una fila hasta el otro extremo. Por último, se inicia la subtask de transporte e ingesta de alimento donde el primero en alimentarse es el pájaro que está al final de la fila, luego se alimenta el que está penúltimo y así sucesivamente hasta que todos se alimenten por igual. Si no alcanza el alimento, la metodología de cooperación se reinicia y los pájaros que comieron se ubican en las primeras posiciones en la siguiente rama con frutos.

---

<sup>71</sup> Ibid., p. 125 - 126.

Figura 37. Pájaros africanos en posición para alimentarse.



Fuente: OKTAR, Adnan. EL CARIÑO ENTRE LOS ANIMALES REVELA LA OBRA DE DIOS.

El otro ejemplo de una metodología de cooperación se presenta en una colonia de hormigas cuando buscan y recolectan alimento, la cual se divide en tres subtareas: la búsqueda, la petición de ayuda y la recolección. La búsqueda es una actividad que desempeña un grupo de individuos que se desplazan en un área cercana al hormiguero hasta que alguno encuentre alimento. Luego de encontrarlo se pasa a la subtarea de petición de ayuda, la cual se puede describir como la primera fase de interacción para lograr la cooperación, ya que en ésta la hormiga que encontró el alimento alerta a sus compañeras y las guía con un rastro de feromona (estigmergia). Seguido se inicia la recolección del alimento que consiste en transportarlo al hormiguero, ya sea que cada individuo recolecte pequeños trozos o que entre todos trasporten el alimento al hormiguero.

Comparando las dos metodologías, se observa que para una aplicación en robótica acuática es más sencillo y fácil de implementar una búsqueda individual y una recolección en pareja, omitiendo la recolección formando una fila, individual o con todos los individuos. Por lo tanto, se decidió tomar como base la metodología de cooperación de las hormigas para seleccionar la metodología a implementar en el diseño del algoritmo de programación.

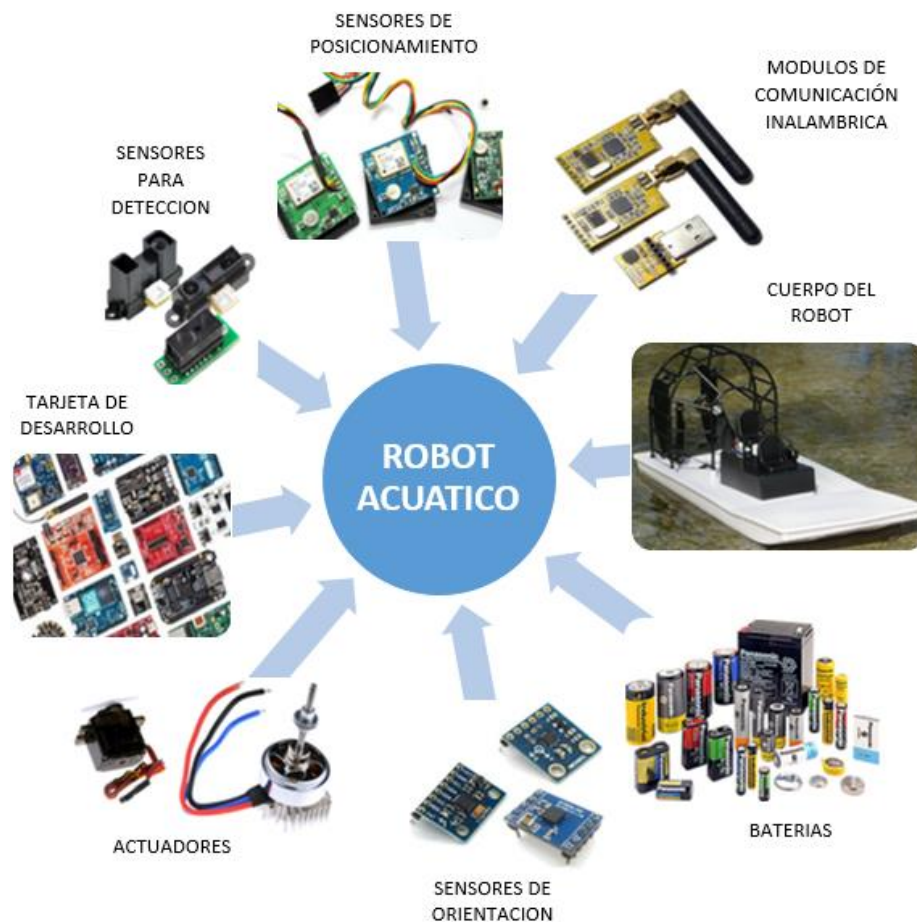
### **3.3 CARACTERISTICAS DE LOS ROBOTS**

Al seleccionar una metodología de cooperación se deben tener en cuenta las características de los individuos. Volviendo al ejemplo del apartado anterior, las hormigas obreras son las encargadas de buscar el alimento, todas son iguales (hembras y estériles) y también cumplen las subtareas de alerta y recolección, es decir que es un grupo homogéneo de individuos y no dependen del trabajo de otro

miembro con diferentes características o capacidades debido a que la tarea no es muy compleja.

Los robots acuáticos cuentan con las mismas características y capacidades lo cual los clasifica en un grupo homogéneo. Cada uno tiene una tarjeta de desarrollo (cerebro del robot), actuadores que permiten el movimiento y la dirección, sensores para esquivar obstáculos, detectar objetos, determinar la posición y dirección, módulos de comunicación inalámbrica y baterías que proveen de energía para su funcionamiento. En la figura 38 se aprecian los diferentes dispositivos que en conjunto conforman cada robot. Como el objetivo del grupo de robots es recolectar objetos flotantes, se plantea un grupo homogéneo ya que la tarea no implica un grado alto de complejidad y además se obtienen distintos beneficios como en la construcción y puesta en marcha.

Figura 38. Componentes de cada robot.



Fuente: Propia del autor.

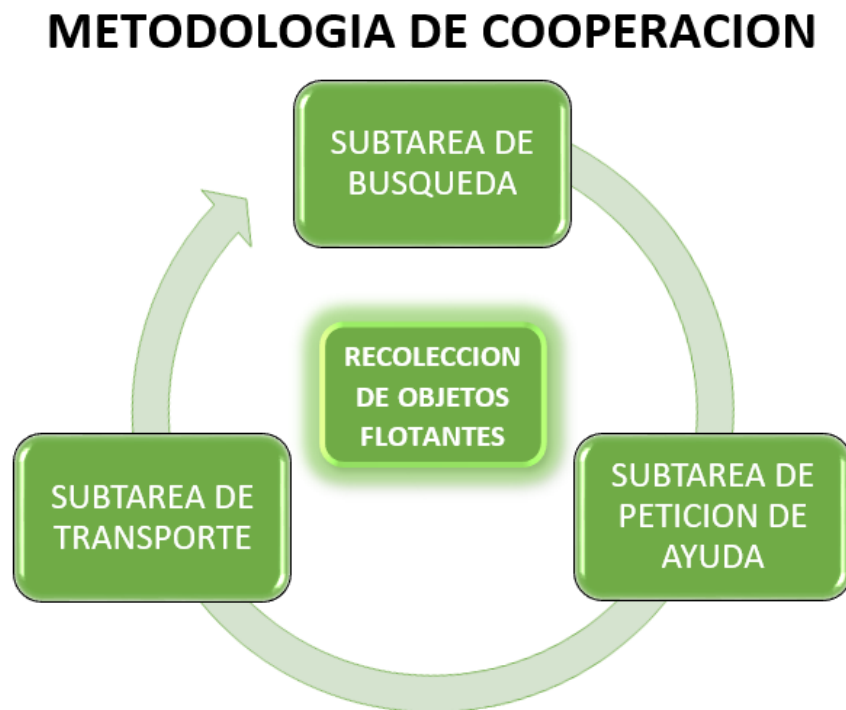


Otra característica por destacar de los robots es que tienen una arquitectura descentralizada ya que cada uno cuenta con las herramientas para reconocer el entorno y efectuar las acciones para cualquier situación imprevista, es decir que no necesitan de un robot líder o centro de control. Además, los robots interactúan de forma directa usando módulos de comunicación inalámbrica y no a través del medio ambiente (estigmergia) o a través de la detección.

### 3.4 TAREA Y SUBTAREAS

La tarea de transportar objetos flotantes está compuesta de 3 subtareas, la búsqueda de objetos, la petición de ayuda y el transporte entre dos individuos a una zona de recolección. La metodología de cooperación que se estableció para el proyecto se aprecia en la figura 39.

Figura 39. Metodología de Cooperación.



Fuente: Propia del autor.

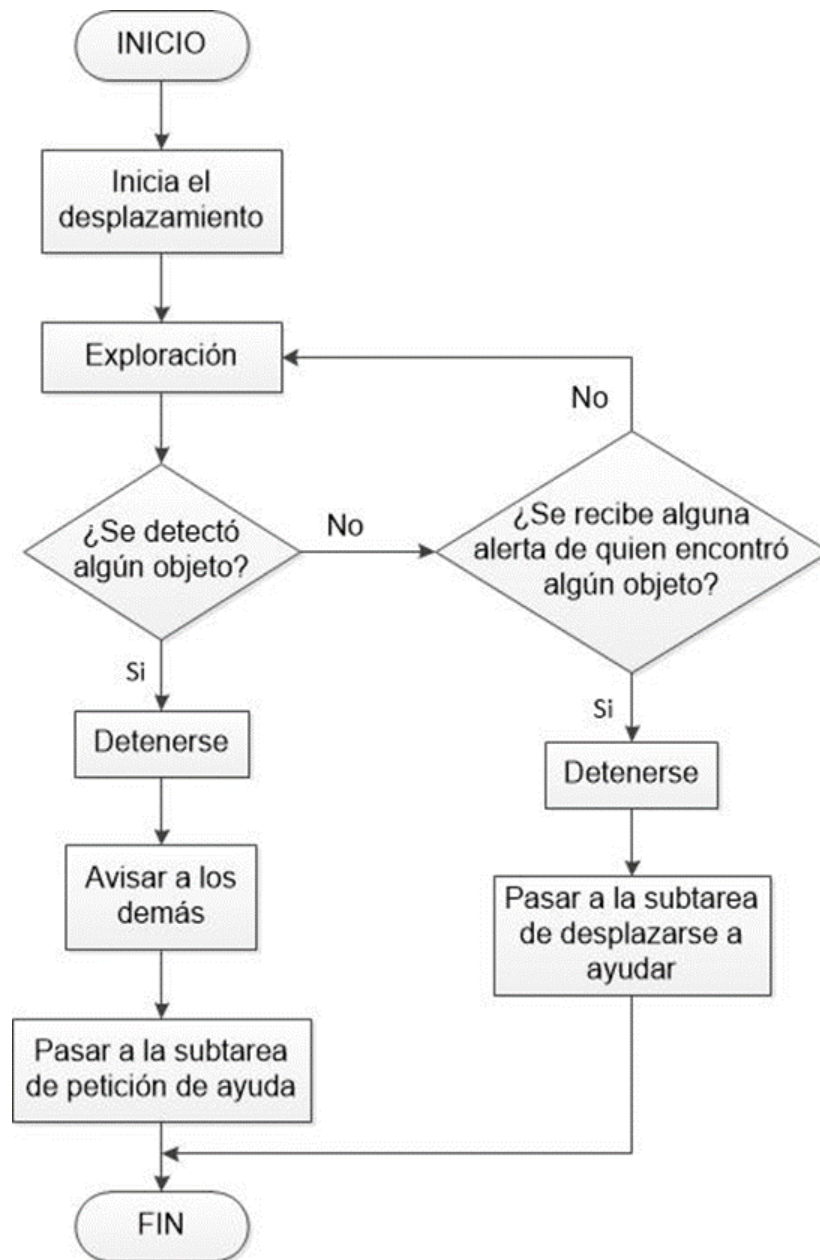
### **3.5.1 Subtarea de búsqueda**

Esta subtarea es asignada a todos los robots en la cual toman el papel de exploradores, pudiendo reconocer áreas de gran tamaño fácilmente y en un menor tiempo, entonces es correcto afirmar que entre mayor sea el número de robots mayor será la probabilidad de encontrar un objeto y además menor será el gasto energético por individuo. La tarea consta del desplazamiento de cada robot sin una trayectoria fija hasta que por medio de los sensores encuentre un objeto flotante, justo en ese momento el robot se detiene y envía una señal para alertar a los demás que la tarea se ha cumplido y que deben seguir con la subtarea de petición de ayuda. La figura 40 muestra el diagrama de flujo para la subtarea.

### **3.5.2 Subtarea de petición de ayuda**

La subtarea de petición de ayuda se divide en dos conductas. Por un lado, el robot que ha encontrado el objeto envía información de su posición y orientación a los demás robots. Por otro lado están los robots que abandonan el papel de exploradores para que sólo uno se convierta en ayudante. Todos se encuentran estáticos luego de recibir la alerta de que algún compañero encontró un objeto flotante y se selecciona alguno para que se dirija hacia él dependiendo de la información de posición y orientación del compañero, y la información de posición y orientación local o propia del robot ayudante. El robot se desplaza de tal forma que primero encuentra la posición donde está su compañero y luego se orienta para poder transportar el objeto de forma cooperativa. La figura 41 presenta los diagramas de flujo de cada conducta de la subtarea.

Figura 40. Diagrama de flujo para la subtask de búsqueda.



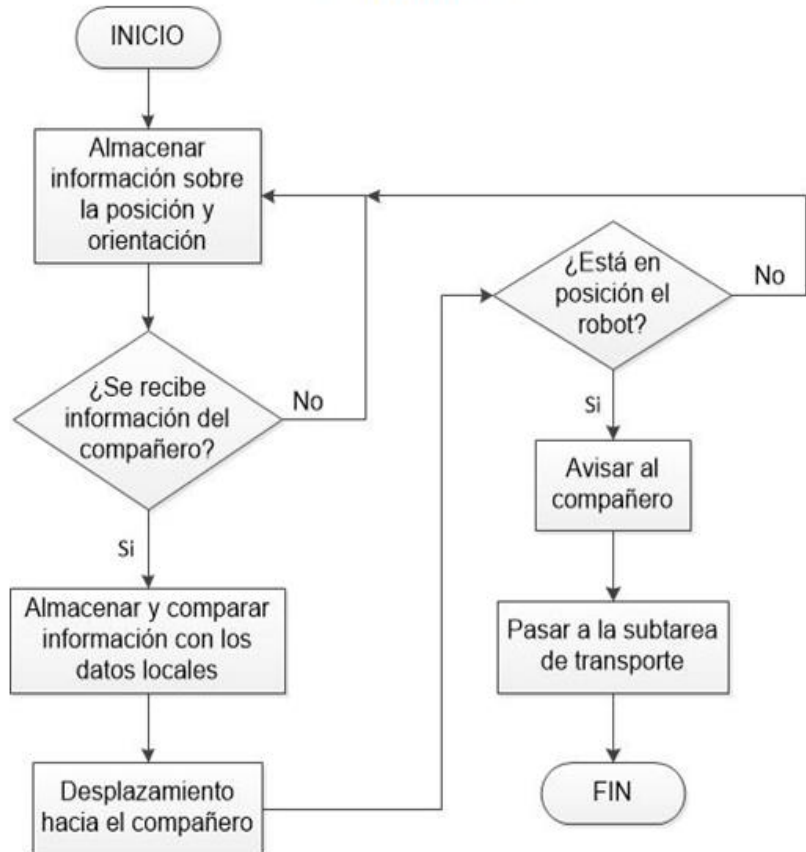
Fuente: Propia del autor.

Figura 41. Diagramas de flujo para la subtask de petición de ayuda.

### Conducta A



### Conducta B



Fuente: Propia del autor.

### 3.5.3 Subtask de transporte

Por último, luego de que el robot con papel de ayudante encuentra a su compañero, éste se ubica de tal manera que el objeto flotante quede en medio de ellos para que se inicie la subtask de transporte donde ambos dejen sus papeles de explorador y ayudante para tomar el papel de transportadores. Los transportadores inician su movimiento de forma simultánea y se orientan hacia la zona de recolección, la cual puede ser el punto de partida donde se inició la búsqueda o cualquier lugar que se decida. En dado caso que el robot pierda su orientación por el peso del objeto y empiece a seguir otra trayectoria, el sistema de la brújula y el gps ayudaran a que vuelva al camino adecuado ya que constantemente estos sensores están enviando información. En la figura 42 se puede ver el diagrama de flujo para la última subtask de la metodología de

cooperación. Luego de cumplir con la subtarea de transporte, los robots retoman el papel de exploradores y se reinicia la metodología de cooperación.

Figura 42. Diagrama de flujo para la subtarea de transporte.



Fuente: Propia del autor.

### 3.5 DISEÑO DE SOFTWARE

El diseño de software es la construcción del algoritmo de programación basado en la metodología de cooperación propuesta, el cual será ejecutado por la tarjeta de desarrollo. El algoritmo no es lo suficientemente robusto como para funcionar de forma autónoma, ya que se deben configurar unos parámetros que dependen del área o espacio de trabajo. Sin embargo, el algoritmo es totalmente funcional y aporta la base para el desarrollo de un algoritmo más completo.

En el diseño del algoritmo se debe tener en cuenta cada dispositivo seleccionado y como debe actuar para lograr el objetivo de una operación fluida en la recolección de objetos (en este caso). Por lo general un algoritmo tiene una estructura definida por tres secciones: cabecera, declaraciones y cuerpo. La cabecera es el espacio para indicar el nombre y el resumen del funcionamiento del algoritmo, aunque puede contener la información que el programador vea necesaria, como por ejemplo su nombre. En las declaraciones se crean y definen las constantes, los tipos de datos, las funciones y las variables que se usan en el algoritmo. Y el cuerpo contiene todas las instrucciones o reglas necesarias para la solución del problema.

Los algoritmos pueden ser representados gráficamente por diagramas de flujo donde se presenta la información mediante símbolos normalizados por la ANSI (American National Standards Institute). Los diagramas tienen líneas de flujo que indican el orden de ejecución del algoritmo y comúnmente son usados para representar algoritmos cortos<sup>72</sup>. El algoritmo de cooperación se representa por diagramas de flujo que resumen el código. El algoritmo escrito en lenguaje C se puede ver en los anexos del documento.

#### 3.6.1 Diagrama general

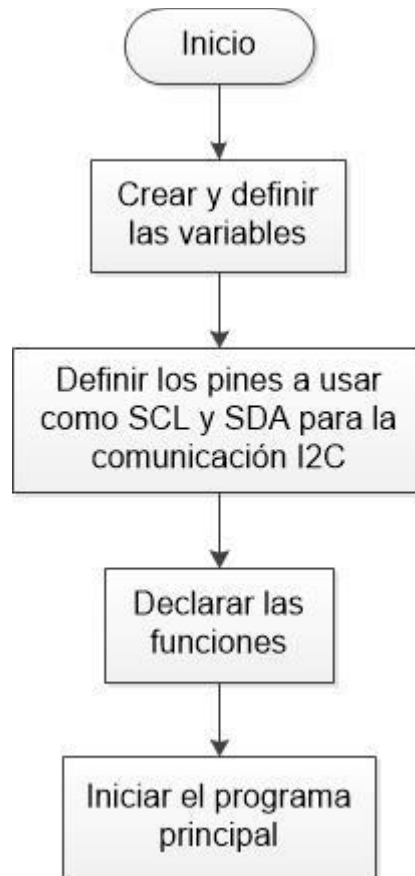
El diagrama general presenta el algoritmo de cooperación de forma simplificada, sin entrar en detalle de las funciones, programa principal y ciclo repetitivo. En la figura 43 se ve el diagrama de flujo general del algoritmo. El diagrama lo conforma en gran parte la sección declaraciones. En esta sección se crean las variables globales que son de tipo float, long, int y char. También se definen los pines a usar como líneas SCL y SDA de la comunicación I2C, y además se declaran las funciones. Seguida a la sección declaraciones esta la

---

<sup>72</sup> Algoritmos y estructuras de programación. [en línea]. Marzo 20095. [consultado 16 de Octubre de 2015]. p. 1-16. Disponible en: <<http://departamento.us.es/edan/php/asig/LICFIS/LFIPC/Tema5FISPC0809.pdf>>

sección cuerpo y es donde están las instrucciones que conforman el programa principal.

Figura 43. Diagrama de flujo general del algoritmo.



Fuente: Propia del autor.

### 3.6.2 Funciones

Antes de hablar del programa principal se explicarán las funciones usadas en el algoritmo. Las funciones son creadas para reducir líneas de código, dar orden al algoritmo y cuando existen procesos repetitivos. Para el algoritmo se decidió declarar las funciones que se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Funciones del algoritmo.

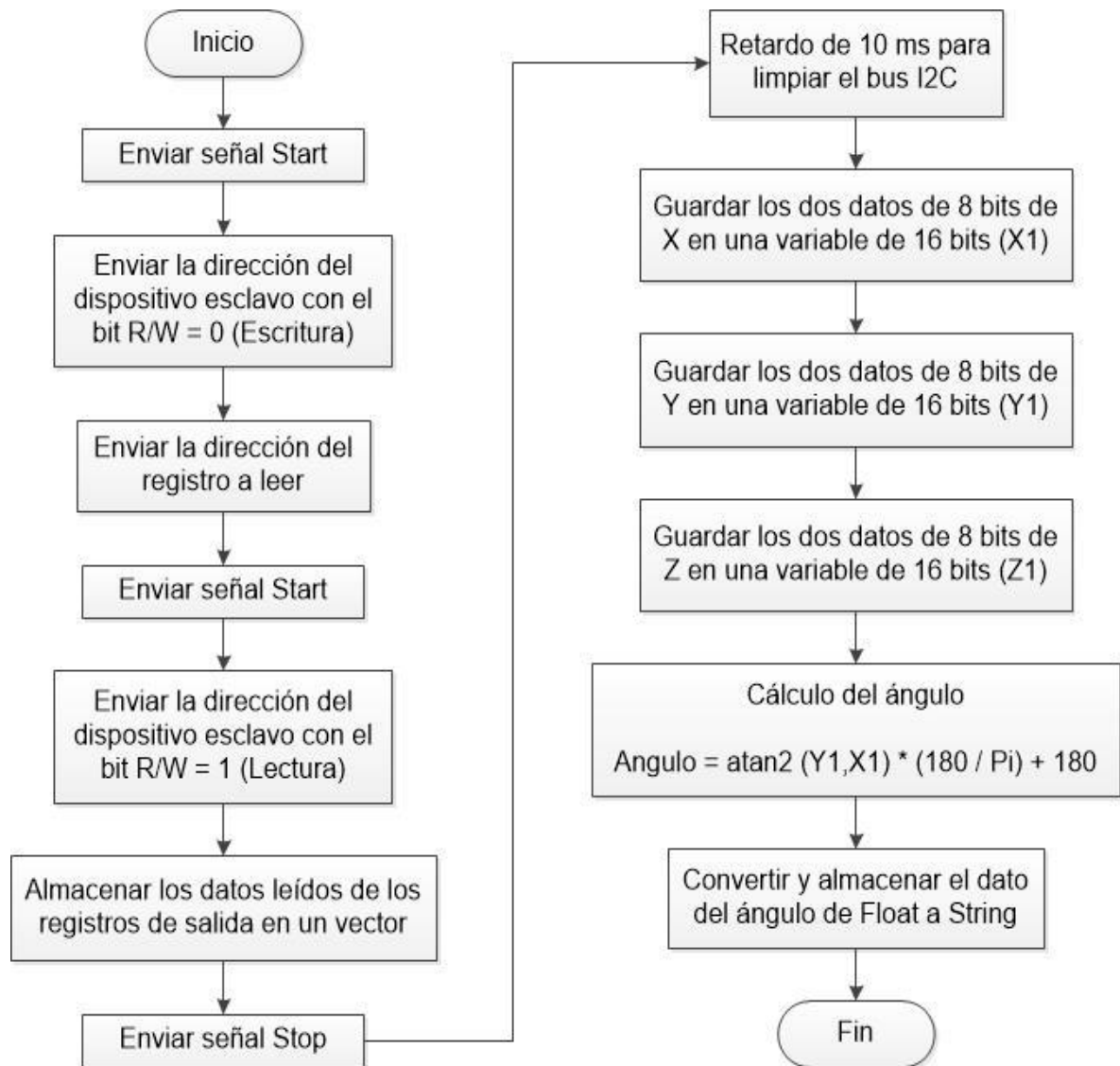
Nombre de la función	Descripción
brujula_	Función creada para el proceso de lectura de la brújula digital GY-273
GPS	Función creada para almacenar los datos transmitidos por el GPS
detener	Función creada para poner los actuadores en estado inicial
mover	Función creada para iniciar el desplazamiento del robot a una velocidad constante
giro_derecha	Función creada para hacer girar el eje del servomotor y así mover las aletas de dirección para que el robot gire a la derecha
giro_izquierda	Función creada para hacer girar el eje del servomotor y así mover las aletas de dirección para que el robot gire a la izquierda
sin_giro	Función creada para poner el eje del servomotor en estado inicial

Fuente: Propia del autor.

La función brujula\_ está nombrada así porque la palabra brujula está reservada por el compilador mikroC. Es usada para leer los datos del campo magnético de los ejes X, Y y Z que se almacenan en los registros de salida del circuito integrado HMC5883L. Posterior a la lectura, los datos se almacenan en una variable de tipo int en forma de vector de seis columnas. Luego se mueven a tres variables de 16 bits para posteriormente hacer el cálculo del ángulo de orientación, dato que se convierte en String para poder enviarlo por el puerto serial. La figura 44 muestra el diagrama de flujo de la función.



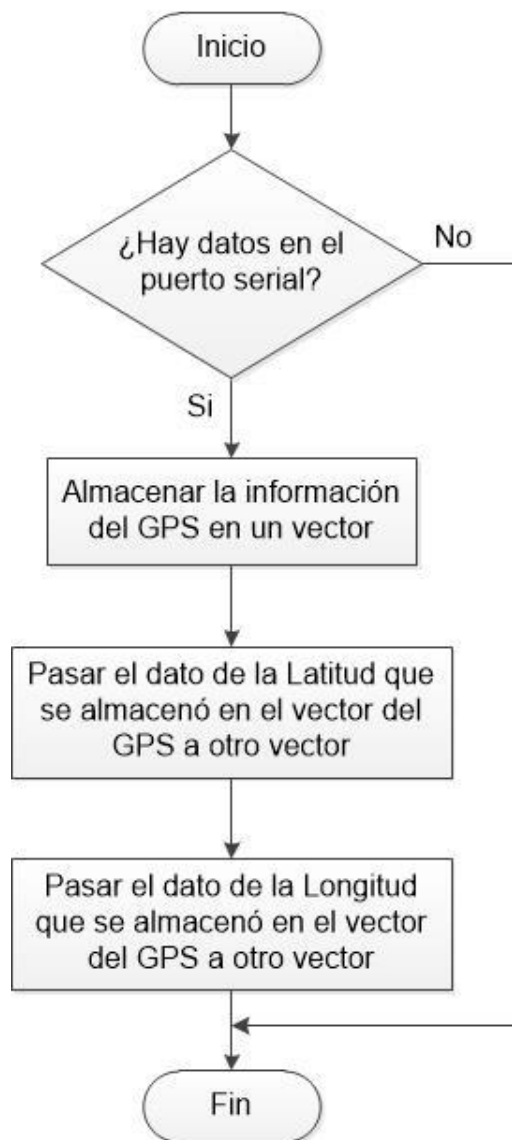
Figura 44. Diagrama de flujo de la función brujula\_.



Fuente: Propia del autor.

La función GPS es usada para almacenar la información que transmite el módulo GPS cada segundo en un vector tipo char de 70 columnas. Luego de almacenar la información, los datos de latitud y longitud son guardados en dos variables char de 9 y 10 columnas respectivamente. El diagrama de flujo se ve en la figura 45.

Figura 45. Diagrama de flujo de la función GPS.

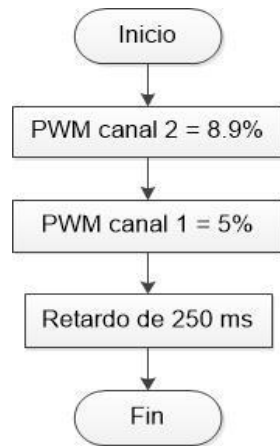


Fuente: Propia del autor.

La función detener establece las señales PWM del canal 1 y del canal 2 (ESC y servomotor respectivamente) en los valores iniciales. El valor inicial para el ESC se presenta cuando la señal PWM tiene un ciclo de utilidad de 5%, lo que se traduce en una señal de entrada con poca energía o en detener el movimiento del motor brushless. Para el servomotor, el valor inicial se da cuando la señal PWM tiene un ciclo de utilidad de 8.9%, lo que significa que está en una posición angular

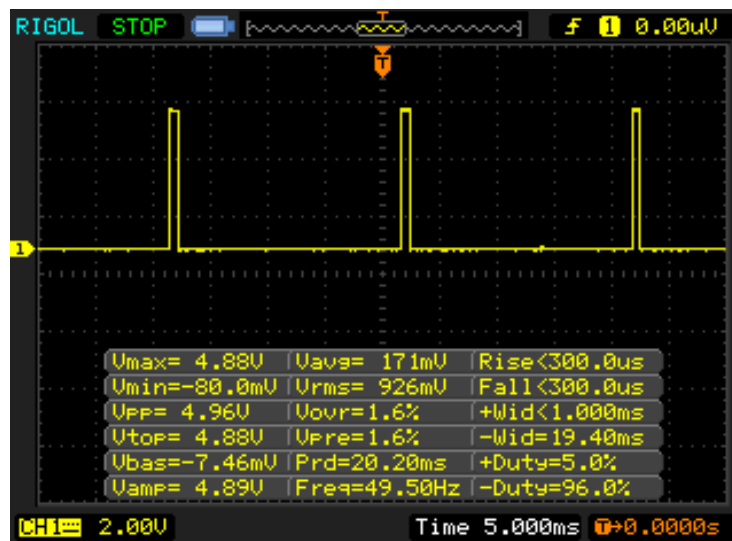
de 0°, que es lo mismo que tener las aletas de dirección en posición central. En la figura 46 se ve el diagrama de flujo de la función. La figura 47 y la figura 48 muestran las señales PWM del canal 1 y canal 2 generadas con la tarjeta de desarrollo para los estados iniciales de los actuadores eléctricos.

Figura 46. Diagrama flujo de la función detener.



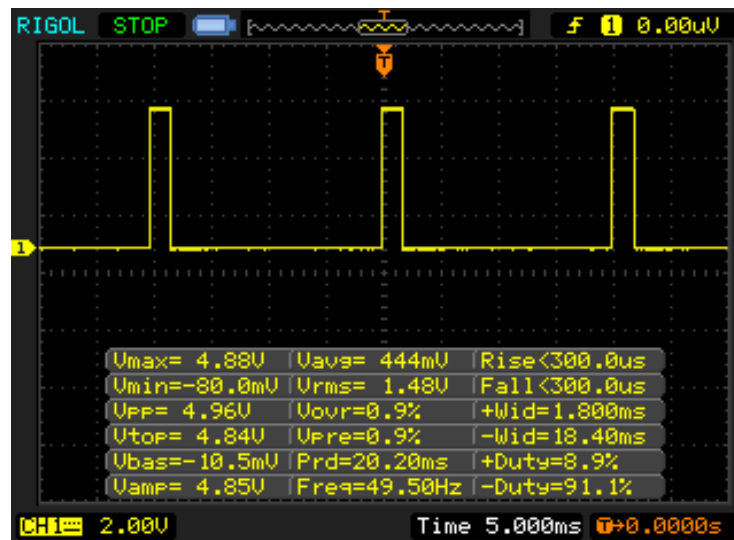
Fuente: Propia del autor.

Figura 47. Señal PWM del canal 1.



Fuente: Propia del autor.

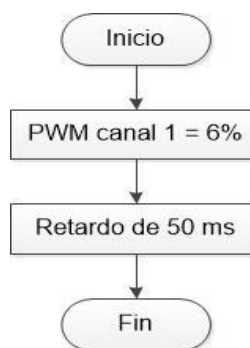
Figura 48. Señal PWM del canal 2.



Fuente: Propia del autor.

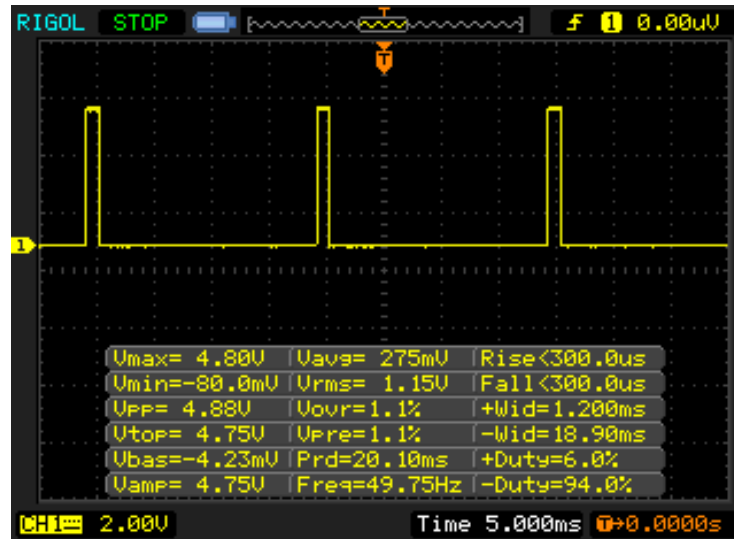
La función mover establece la señal PWM del canal 1 con un ciclo de utilidad de 6%, la cual es enviada al ESC con el propósito de tener una velocidad fija del motor brushless. La señal PWM tiene un ciclo de utilidad bajo para garantizar estabilidad con un desplazamiento lento. Además puede ser útil en la subtarea de exploración porque el tiempo que tardará y la distancia que recorrerá luego de la detección será el menor posible. La figura 49 muestra el diagrama de flujo de la función y la figura 50 la señal PWM generada por la tarjeta de desarrollo.

Figura 49. Diagrama flujo de la función mover.



Fuente: Propia del autor.

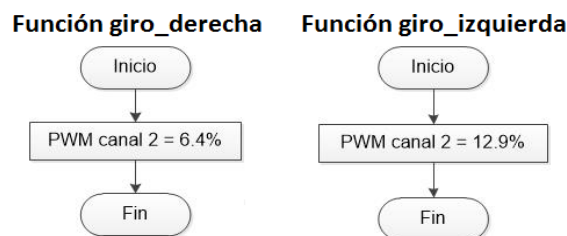
Figura 50. Señal PWM generada por la tarjeta de desarrollo.



Fuente: Propia del autor.

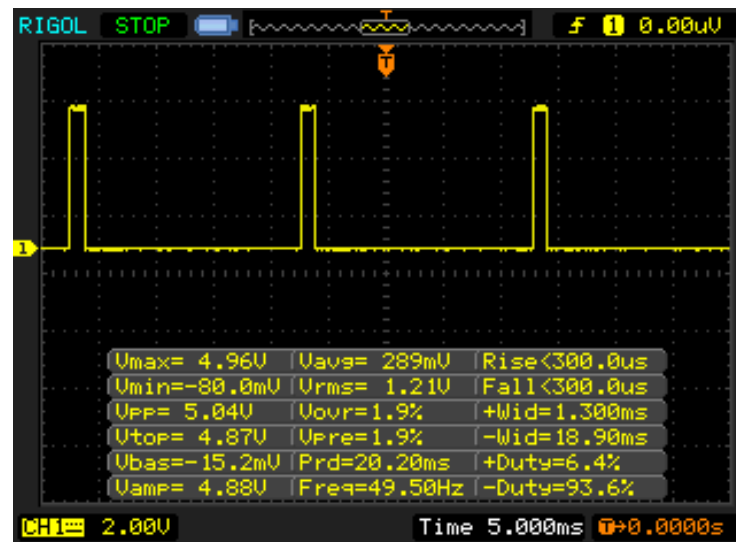
Las funciones giro\_derecha y giro\_izquierda establecen la señal PWM del canal 2 en los valores máximos y mínimos respectivamente. Los límites están definidos por el mecanismo de transmisión de movimiento que tienen las aletas de dirección, al cual está conectado el eje del servomotor. Con un ciclo de utilidad de 6.4% de la señal PWM, las aletas se posicionan para que el robot gire hacia la derecha. De igual forma pero con un ciclo de utilidad del 12.9%, el robot gira hacia la izquierda. En la figura 51 se presentan los diagramas de flujo de las funciones. La figura 52 y 53 muestran la señal PWM que se genera cuando se ejecutan las funciones giro\_derecha y giro\_izquierda (respectivamente) en la tarjeta de desarrollo.

Figura 51. Diagrama flujo del giro a la derecha y a la izquierda.



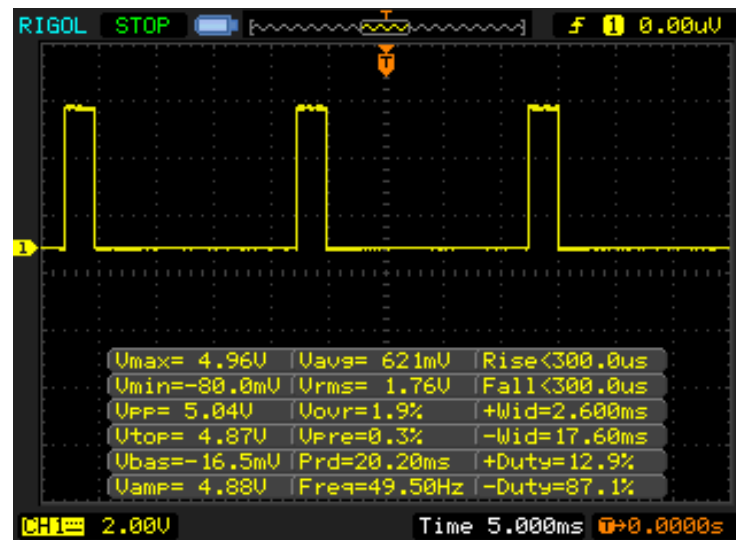
Fuente: Propia del autor.

Figura 52. Señal PWM de giro a la derecha.



Fuente: Propia del autor.

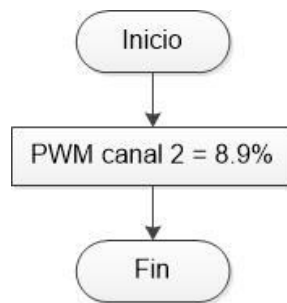
Figura 53. Señal PWM de giro a la izquierda.



Fuente: Propia del autor.

Por último, la función `sin_giro` es usada para establecer la señal PWM del servomotor en estado inicial, lo que significa que las aletas de dirección pasan a estar en posición central. La figura 54 presenta el diagrama de flujo de la función.

Figura 54. Diagrama de flujo de la función `sin_giro`.

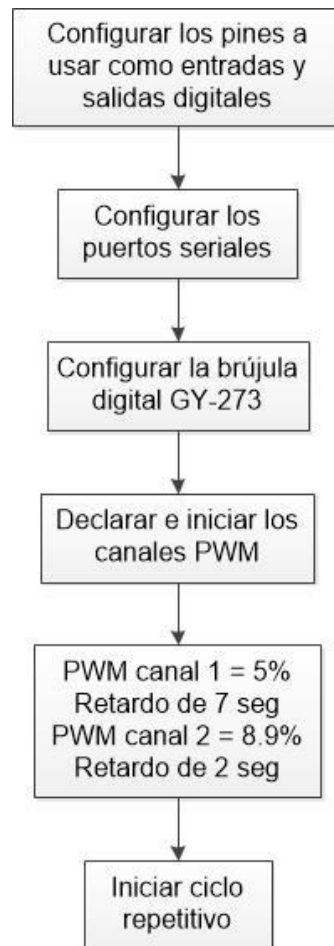


Fuente: Propia del autor.

### 3.6.3 Programa principal

El programa principal es el cuerpo del algoritmo que contiene todas las instrucciones. Las instrucciones pueden ser, por ejemplo, de configuración, iniciación o de ciclo repetitivo. Para cumplir las necesidades del proyecto, en el programa principal se encuentran las instrucciones para configurar los pines de entrada y salida digitales, los puertos seriales, la brújula digital, iniciar los canales PWM y el ciclo repetitivo. La figura 55 muestra el diagrama de flujo del programa principal. Las instrucciones son ejecutadas una vez (excepto el ciclo repetitivo) y para que se ejecuten nuevamente se debe reiniciar la tarjeta de desarrollo.

Figura 55. Diagrama de flujo del programa principal.



Fuente: Propia del autor.

La configuración de la brújula es ejecutada cada vez que se energiza el sistema para garantizar su correcto funcionamiento, ya que los registros de configuración se pueden reiniciar cuando se quita la alimentación. También, la señal PWM del canal 1 debe iniciar con un ciclo de utilidad bajo y esperar un tiempo aproximado de 7 segundos hasta que el ESC compruebe la posición del rotor del motor brushless y se pueda iniciar el movimiento. Las señales PWM se establecen en estado inicial para los actuadores.

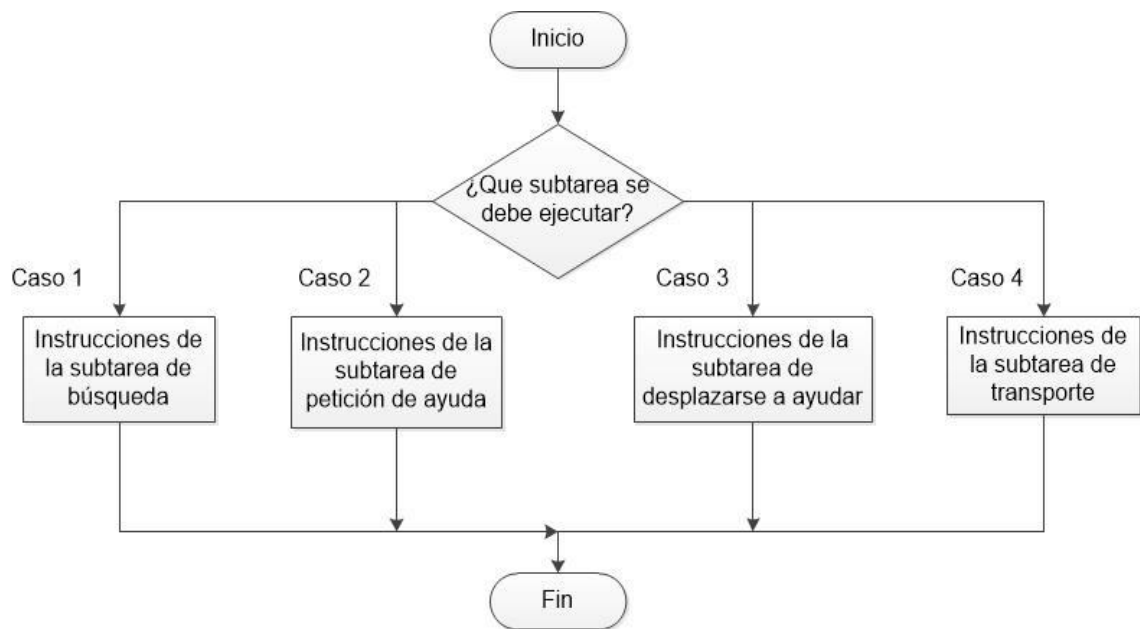


### 3.6.4 Ciclo repetitivo

En el ciclo repetitivo se encuentran las instrucciones para ejecutar las subtareas de la metodología de cooperación. El ciclo consta de una sentencia switch() usada para seleccionar las instrucciones a ejecutar dependiendo del valor de una variable, es decir que la variable tomara un valor asociado a una de las subtareas. La variable usada para la selección de las subtareas es global, de tipo int y con un valor inicial igual a 1, lo que indica que el primer caso se ejecutará inmediatamente después de que el ciclo repetitivo inicie.

La sentencia del ciclo está dividida en cuatro casos. El primero contiene las instrucciones de la subtarea de búsqueda. El segundo contiene las instrucciones para la subtarea de petición de ayuda. El tercero contiene las instrucciones de la subtarea de desplazamiento hacia quien pidió la ayuda. Y el cuarto contiene las instrucciones para la subtarea del transporte del objeto. El diagrama de flujo del ciclo repetitivo se ve en la figura 56.

Figura 56. Diagrama de flujo del ciclo repetitivo.



Fuente: Propia del autor.

#### **3.6.4.1 Caso 1**

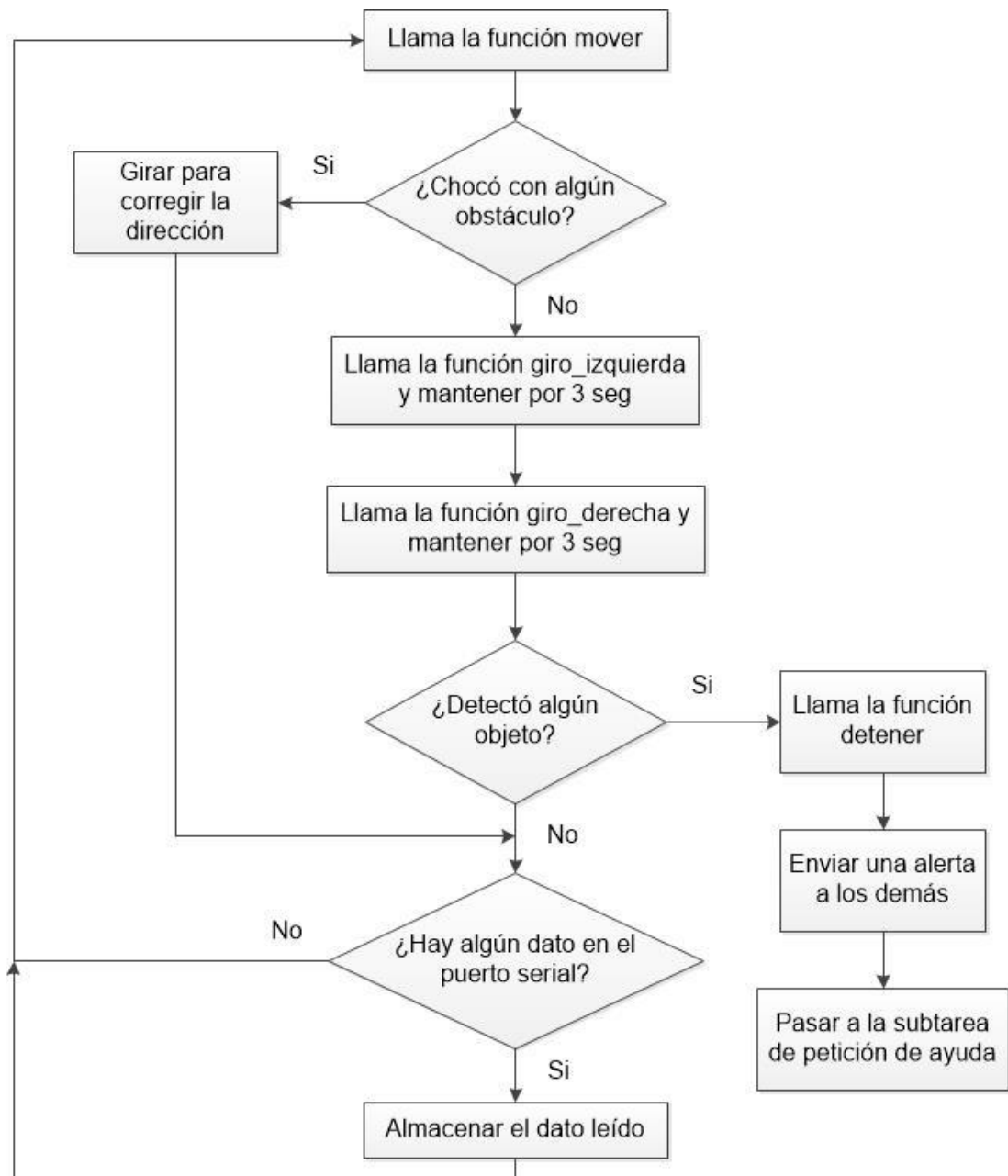
Cada uno de los robots debe ejecutar las instrucciones del primer caso para lograr una mayor exploración del área en menor tiempo. Además, las instrucciones dan paso a dos subtareas, la subtarea de petición de ayuda cuando se encuentra un objeto, y la subtarea de desplazamiento a ayudar cuando recibe una alerta de quien encontró el objeto. Una parte del algoritmo del caso 1 se enfoca en corregir la dirección del desplazamiento cuando el robot choca de frente con un obstáculo. Por otro lado, antes de terminar la subtarea de búsqueda, todos los robots se detienen al ejecutar la función detener.

Según las instrucciones del caso 1, cuando el robot se esté desplazando, gira a la izquierda por tres segundos y luego gira a la derecha por otros tres segundos. No se ve necesario emplear un desplazamiento aleatorio ya que ese no es el objetivo de la subtarea. En la figura 57 y figura 58 se muestra el diagrama de flujo con las instrucciones de la subtarea de búsqueda.

#### **3.6.4.2 Caso 2**

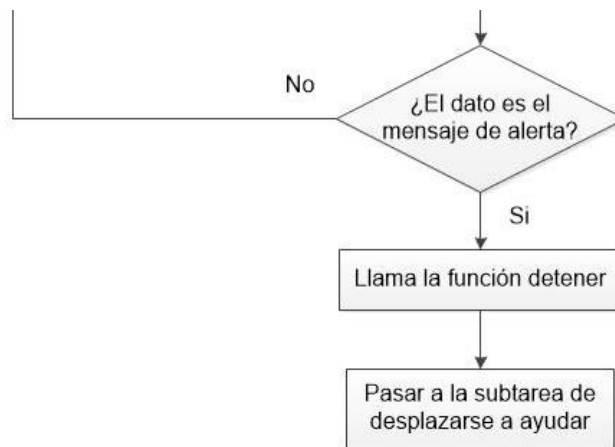
Las instrucciones del caso 2 cumplen el objetivo de recolectar los datos de posición y ángulo de orientación del robot que encontró el objeto, para enviarlos inalámbricamente al robot que lo puede ayudar a transportarlo. También tiene instrucciones para leer la alerta que envía el robot que se desplaza a ayudar cuando esté en una posición cercana y pueda pasar a la subtarea de transporte. La figura 59 deja ver el diagrama de flujo.

Figura 57. Diagrama de flujo de la subtarea de búsqueda parte 1.



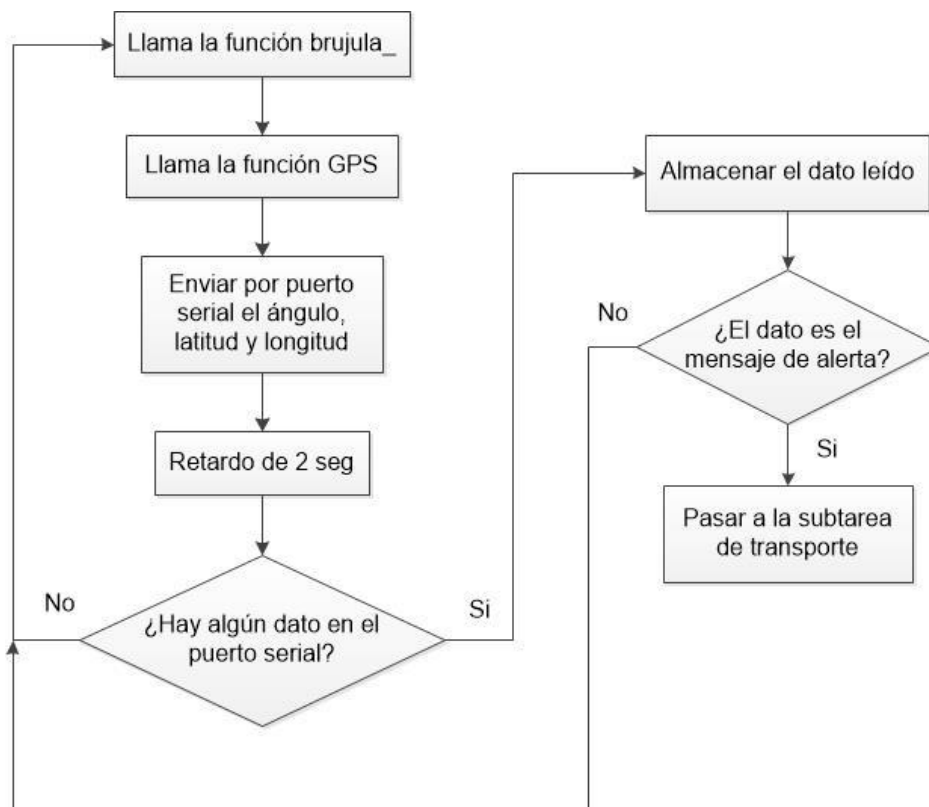
Fuente: Propia del autor.

Figura 58. Diagrama de flujo de la subtaska de búsqueda parte 2.



Fuente: Propia del autor.

Figura 59. Diagrama de flujo de la subtaska de petición de ayuda.



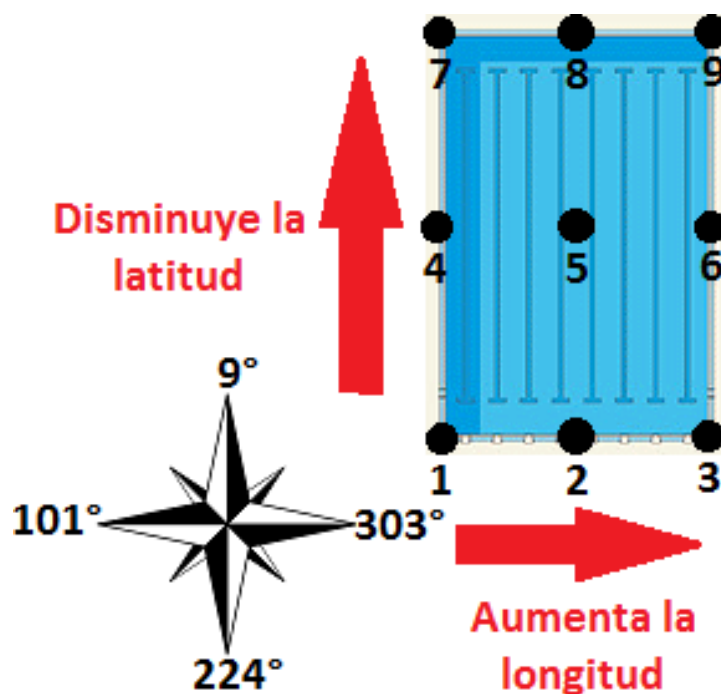
Fuente: Propia del autor.

### 3.6.4.3 Caso 3

En este caso se encuentran las instrucciones del robot que se desplaza para ayudar a transportar el objeto. En primer lugar, el robot cambia su orientación a una orientación deseada y posteriormente se detiene. Seguido, llama las funciones `brujula_` y `GPS` para almacenar la información de su posición y orientación y poder compararlas con la misma información del robot que encontró el objeto. Dicha comparación es basada en la resta de la información, es decir que los datos locales (del robot que se desplaza) y externos (del robot que encontró el objeto) se convierten a números decimales y se restan.

Parte importante del algoritmo del caso 3 está compuesto por sentencias que comparan el resultado de la resta de cada dato (latitud, longitud y ángulo). Las sentencias cambian dependiendo del área donde se encuentren recolectando objetos los robots. Del área se deben saber las latitudes y longitudes máximas y mínimas y entender el comportamiento de éstos datos de posición. También se debe saber el ángulo para diferentes orientaciones del robot. Un ejemplo de aplicación se presenta en la figura 60 donde el cuerpo de agua o área de trabajo es una piscina, y los datos de la posición para cada punto están en la tabla 9.

Figura 60. Ejemplo de aplicación.



Fuente: Propia del autor.

Tabla 9. Datos del ejemplo de aplicación.

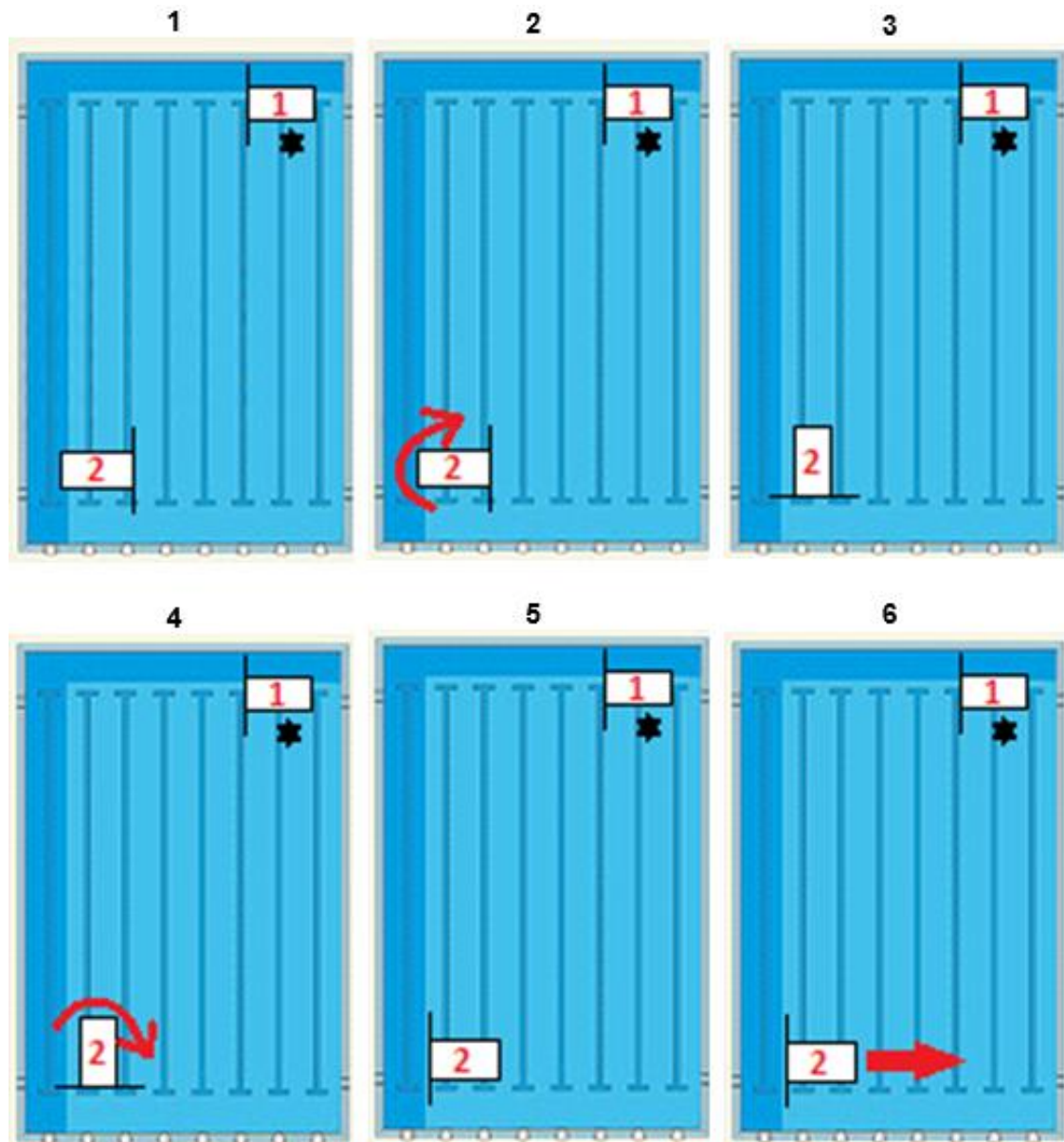
Punto	Latitud (°) Norte	Longitud (°) Oeste
1	4.62334733333	74.1768585
2	4.62331816667	74.1769011667
3	4.62334233333	74.1769368333
4	4.62317333333	74.1768588333
5	4.62316466667	74.1769076667
6	4.623167	74.1769396667
7	4.62309033333	74.1768571667
8	4.62306083333	74.176908
9	4.6230925	74.1769421667

Fuente: Propia del autor.

En las sentencias para el cambio de orientación al iniciar el caso, una orientación correcta es cuando el dato de la brújula del robot es cercano o igual a 9°, pero si está entre 9° y 224° es una orientación negativa, y si es menor a 9° o mayor a 224° es una orientación positiva. Según los datos de la tabla anterior, las sentencias que tienen en cuenta las restas de los datos dan las órdenes de los movimientos que debe hacer el robot para llegar a la posición del compañero. Las sentencias forman un algoritmo de navegación simple para lograr desplazar un robot en un espacio conocido por una persona, más no por el robot. El algoritmo de navegación ejecuta desplazamientos horizontales y verticales para llegar a la posición deseada, y además gira para ajustar la orientación como la del otro robot.

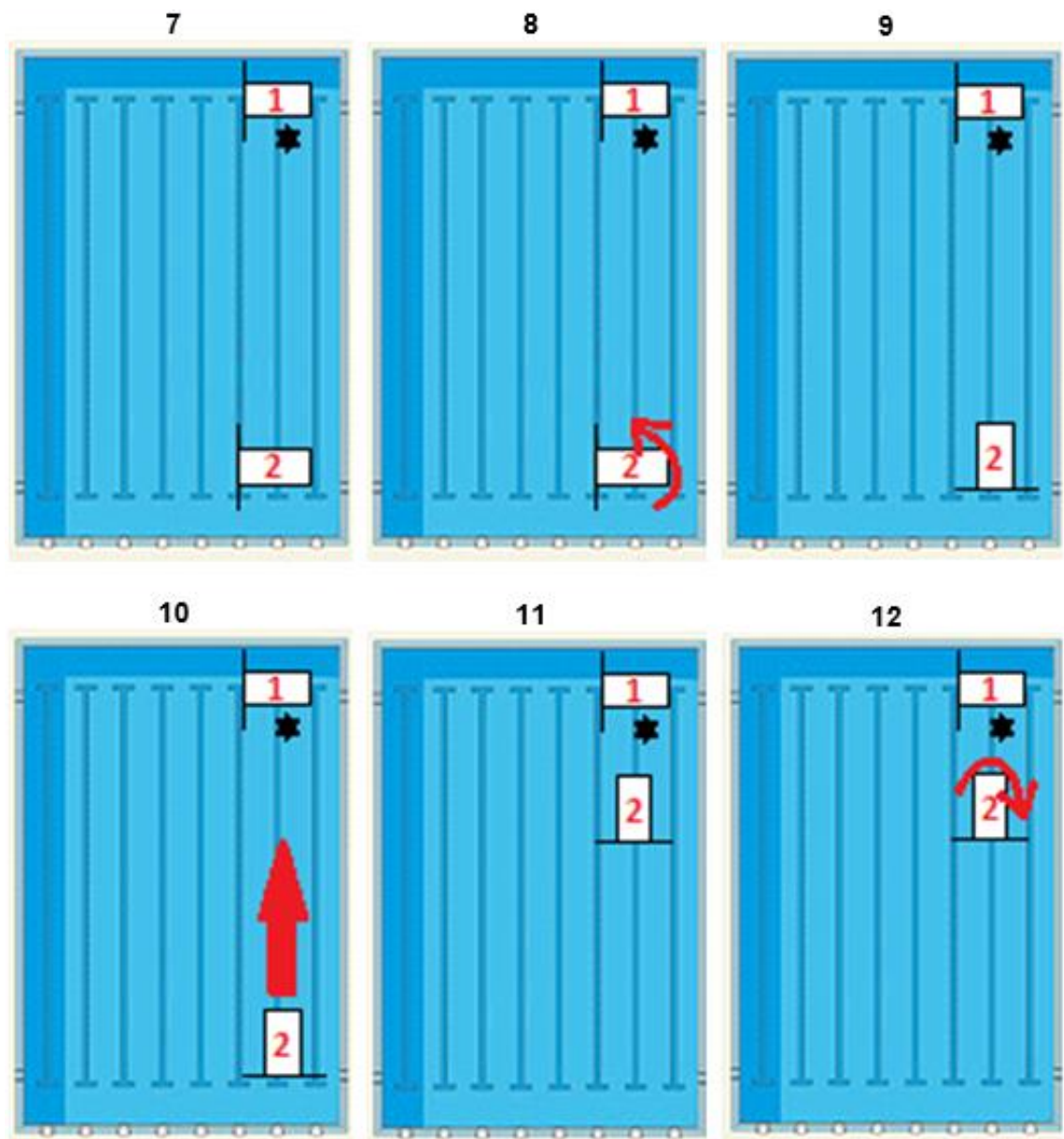
En las figuras 61, 62 y 63 se presenta un ejemplo del funcionamiento del algoritmo de navegación usado, cabe aclarar que es posible mejorar y diseñar un algoritmo que se pueda ejecutar en cualquier ambiente sin importar las dimensiones. Cuando el robot esté en la posición requerida con la orientación necesaria, detiene su funcionamiento y envía una señal inalámbricamente para que ambos robots inicien la subtaska de transporte del objeto. En las figuras 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75 se muestra el diagrama de flujo del caso.

Figura 61. Funcionamiento del algoritmo de navegación parte 1.



Fuente: Propia del autor.

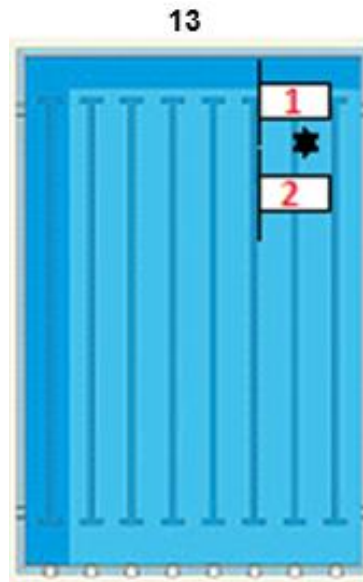
Figura 62. Funcionamiento del algoritmo de navegación parte 2.



Fuente: Propia del autor.

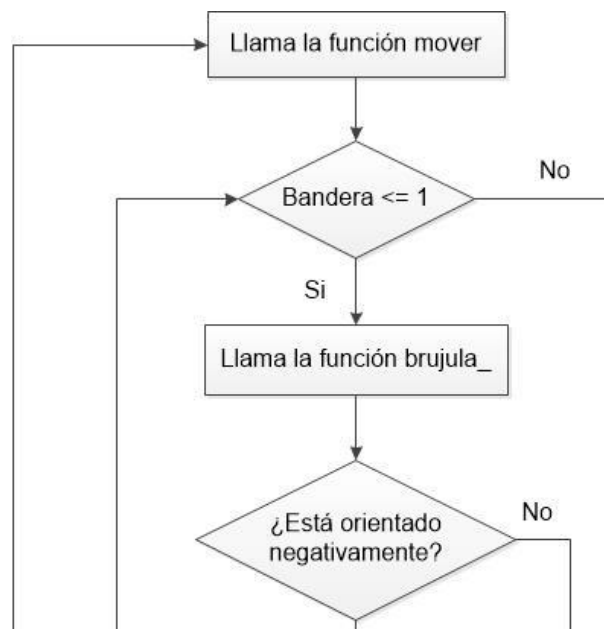


Figura 63. Funcionamiento del algoritmo de navegación parte 3.



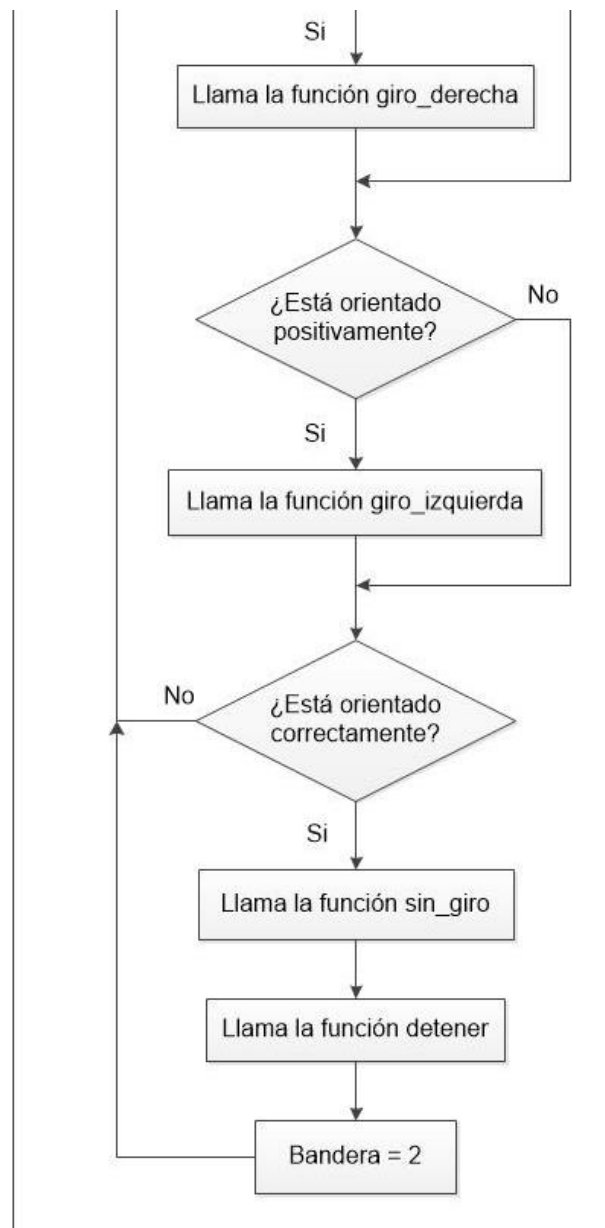
Fuente: Propia del autor.

Figura 64. Diagrama de la subtarea de desplazamiento a ayudar parte 1.



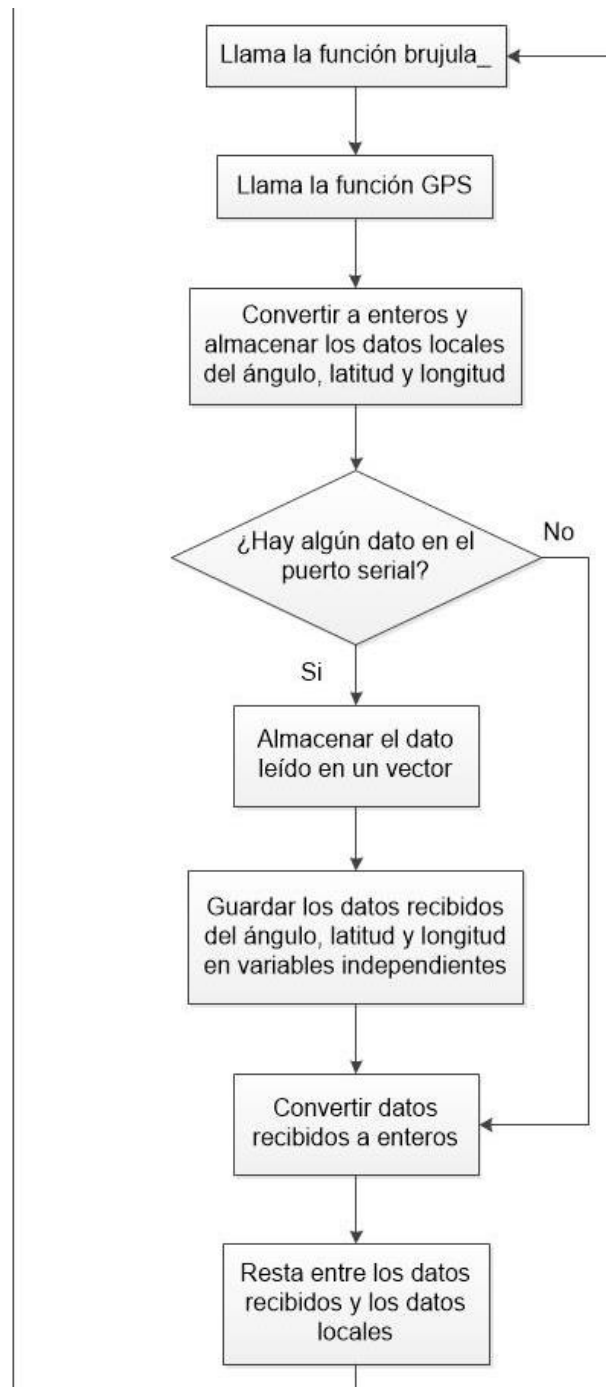
Fuente: Propia del autor.

Figura 65. Diagrama de la subtarea de desplazamiento a ayudar parte 2.



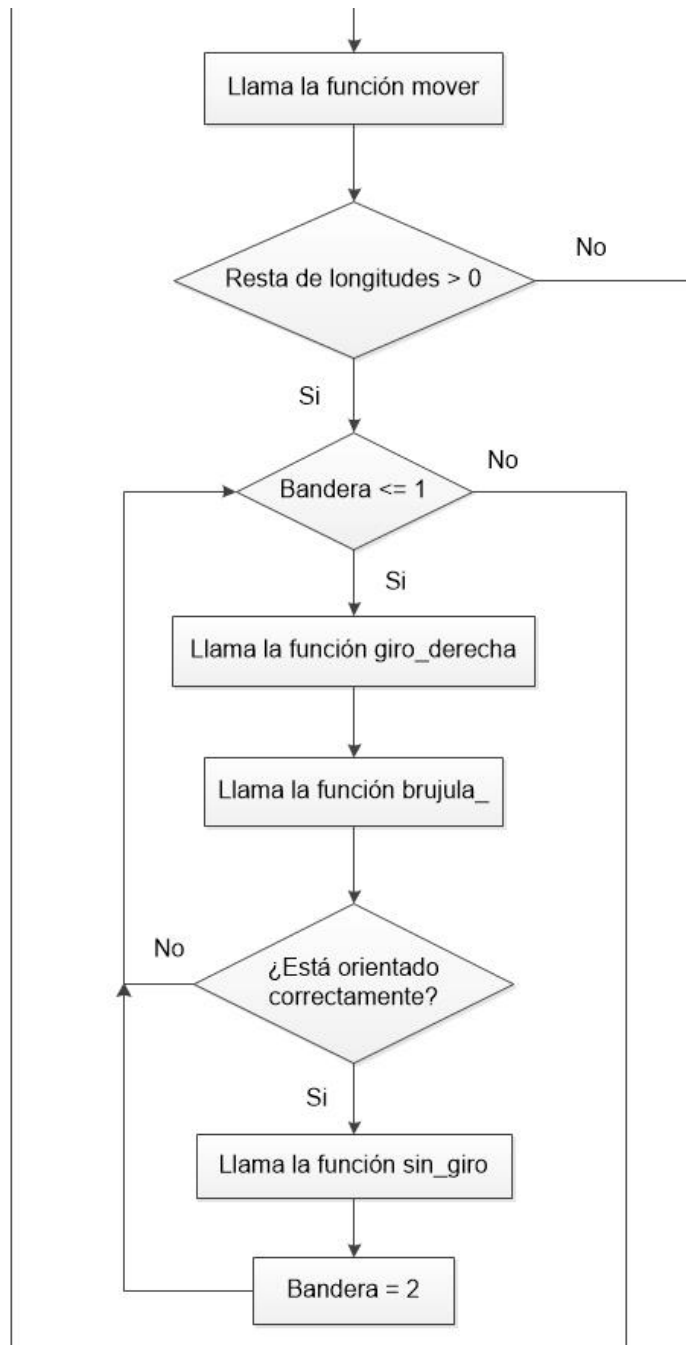
Fuente: Propia del autor.

Figura 66. Diagrama de la subtarea de desplazamiento a ayudar parte 3.



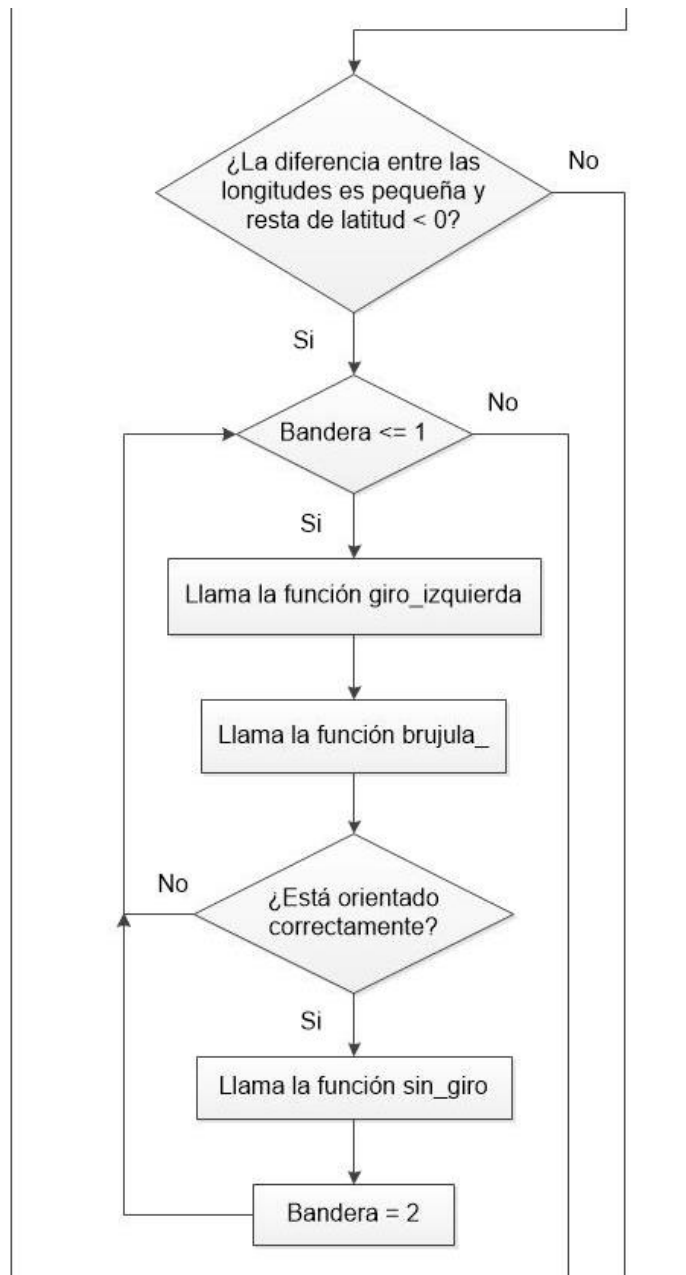
Fuente: Propia del autor.

Figura 67. Diagrama de la subtarea de desplazamiento a ayudar parte 4.



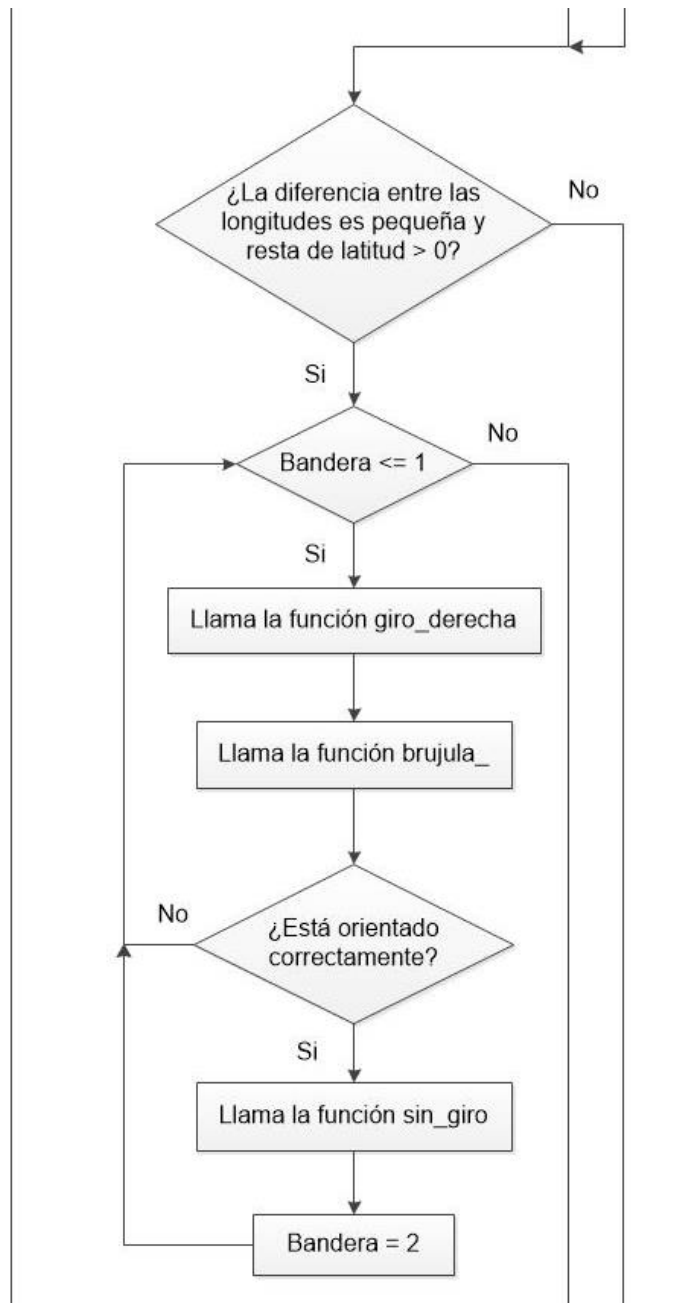
Fuente: Propia del autor.

Figura 68. Diagrama de la subtarea de desplazamiento a ayudar parte 5.



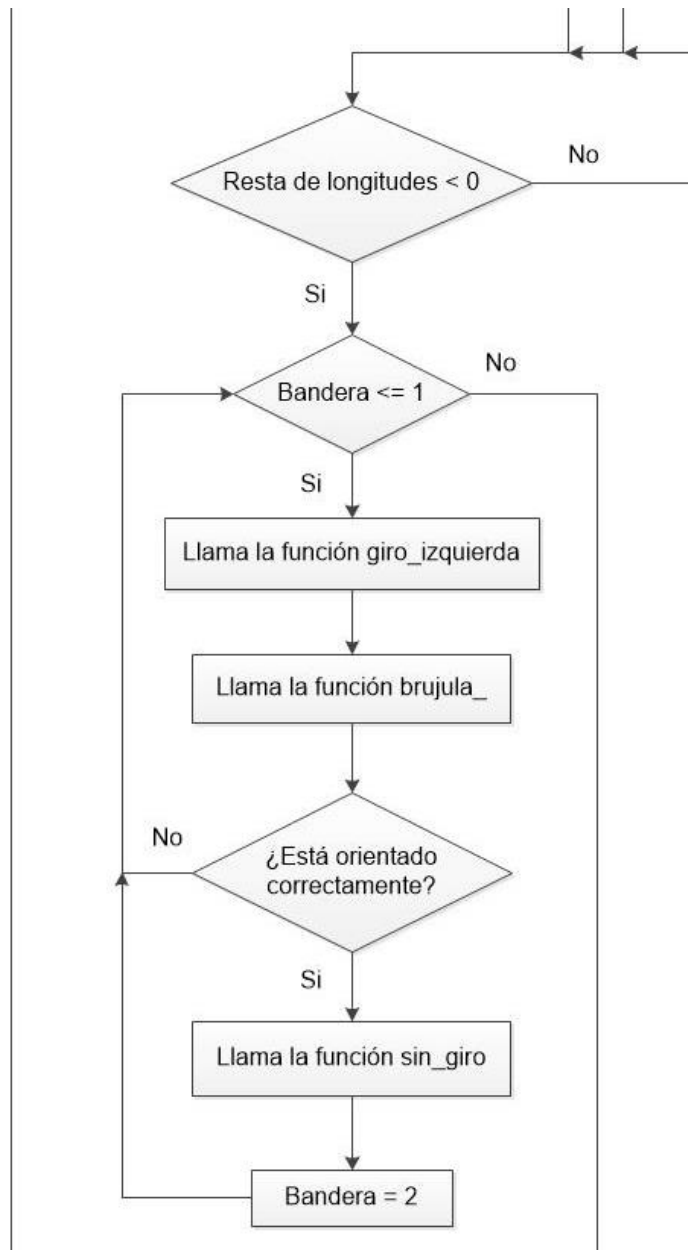
Fuente: Propia del autor.

Figura 69. Diagrama de la subtarea de desplazamiento a ayudar parte 6.



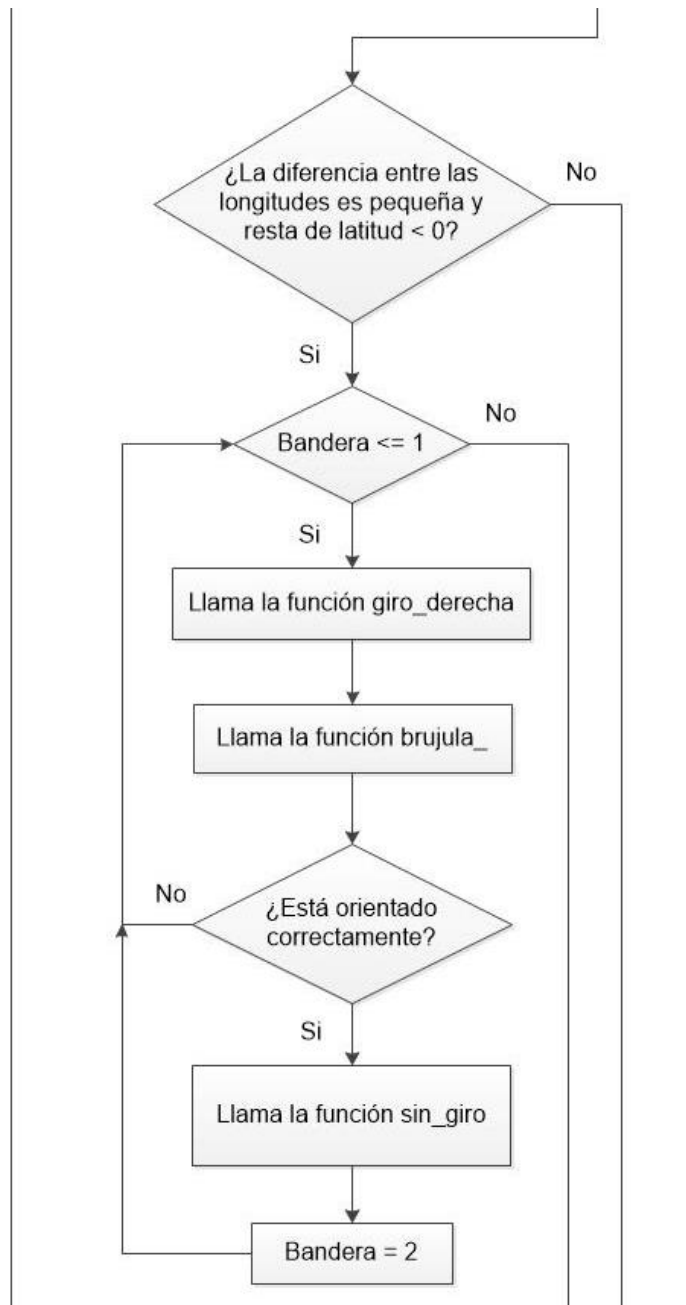
Fuente: Propia del autor.

Figura 70. Diagrama de la subtarea de desplazamiento a ayudar parte 7.



Fuente: Propia del autor.

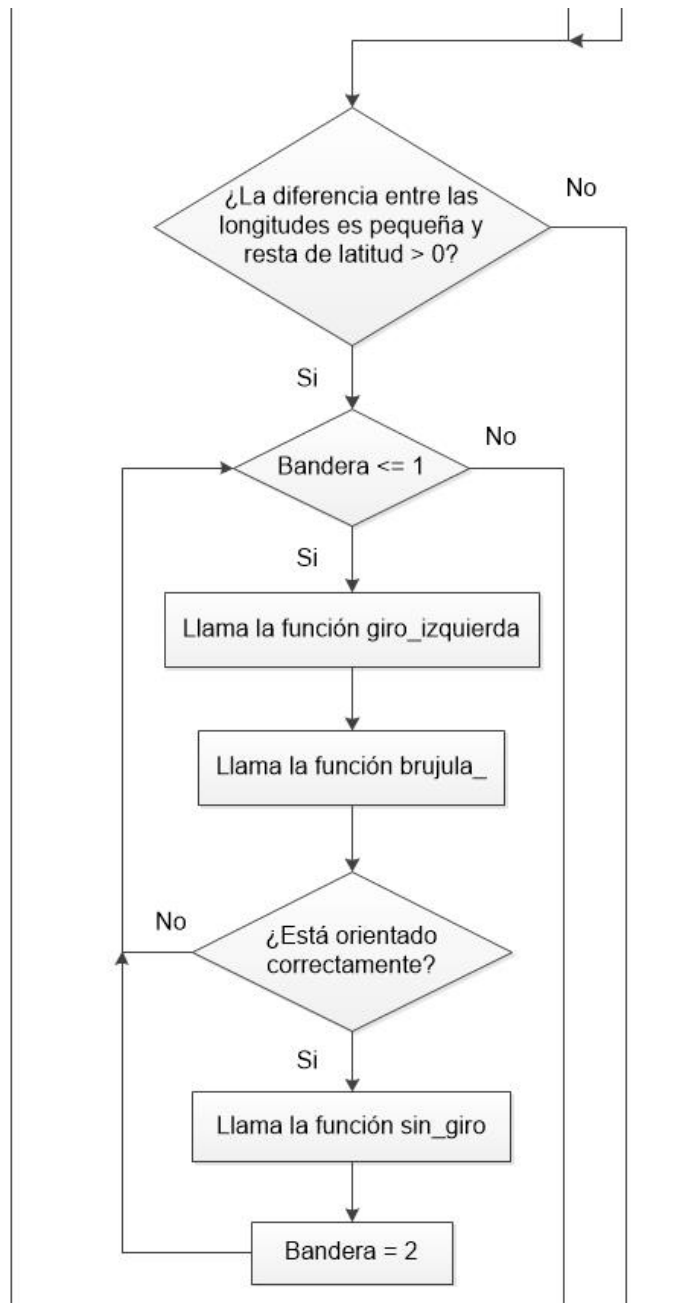
Figura 71. Diagrama de la subtarea de desplazamiento a ayudar parte 8.



Fuente: Propia del autor.

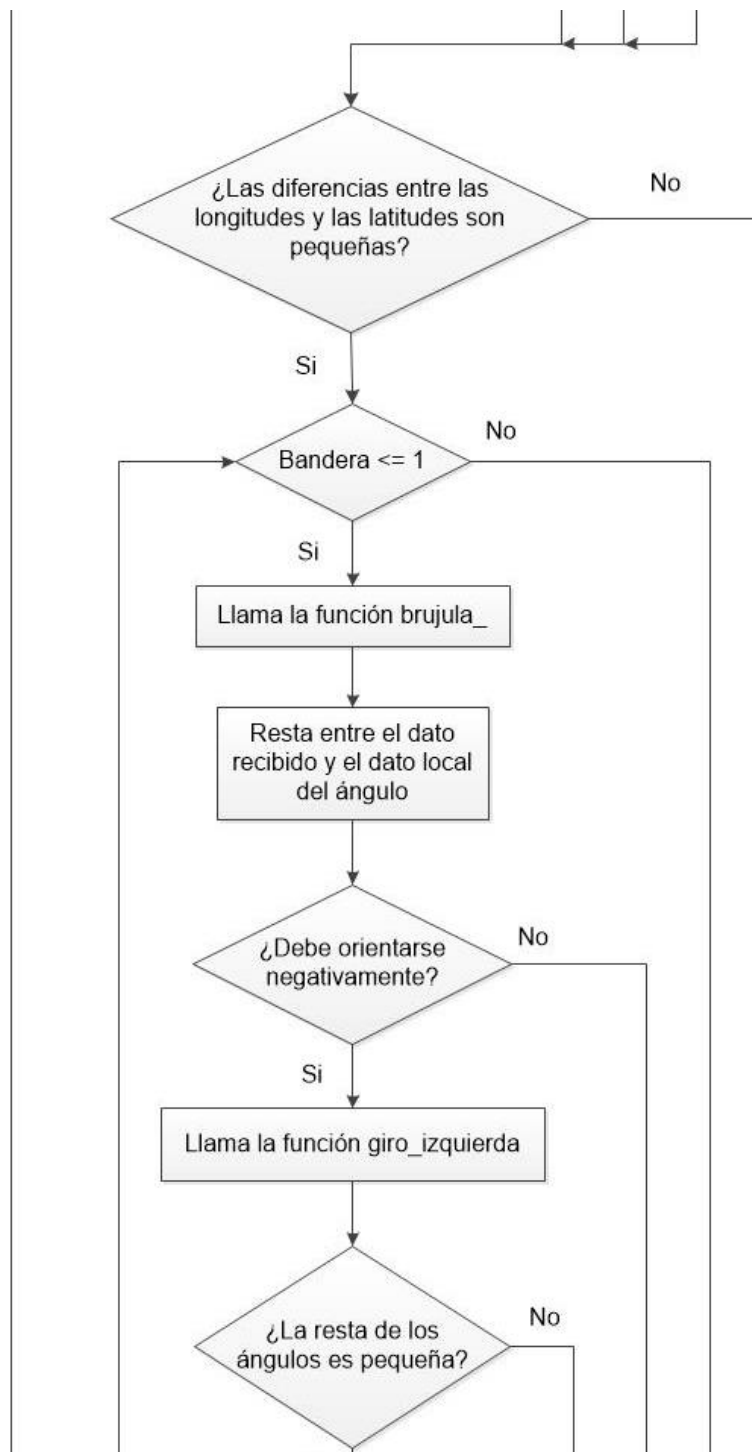


Figura 72. Diagrama de la subtarea de desplazamiento a ayudar parte 9.



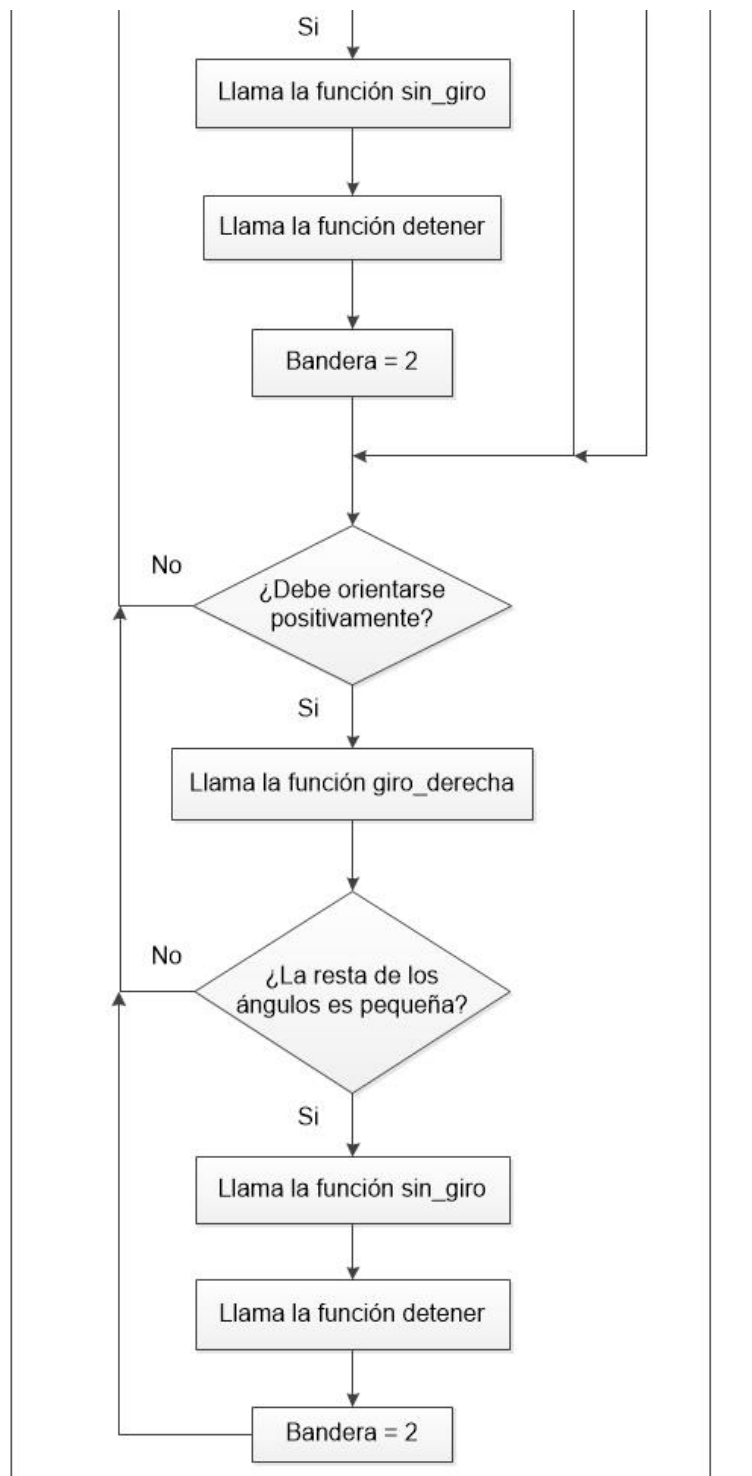
Fuente: Propia del autor.

Figura 73. Diagrama de la subtarea de desplazamiento a ayudar parte 10.



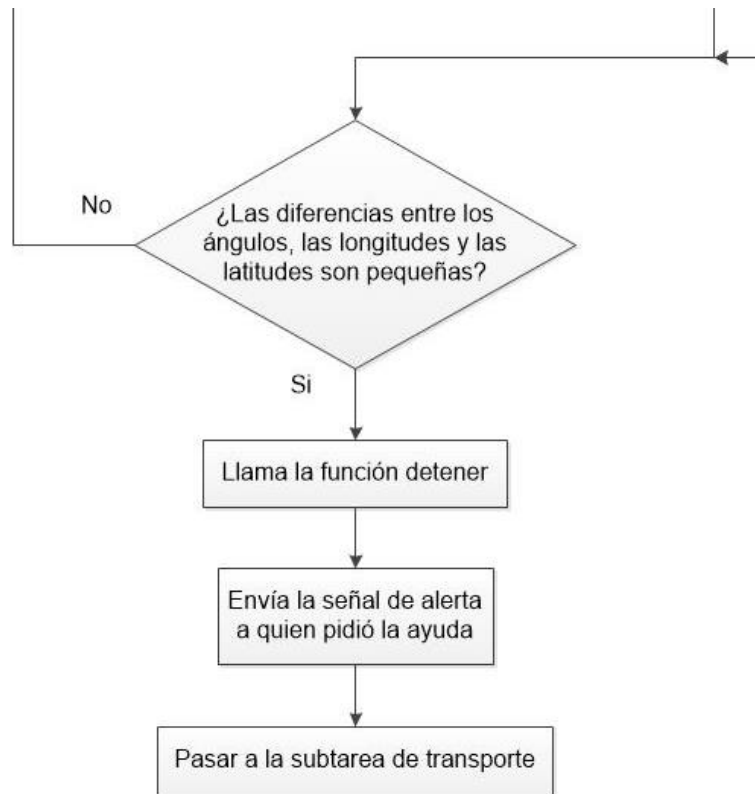
Fuente: Propia del autor.

Figura 74. Diagrama de la subtarea de desplazamiento a ayudar parte 11.



Fuente: Propia del autor.

Figura 75. Diagrama de la subtarea de desplazamiento a ayudar parte 12.

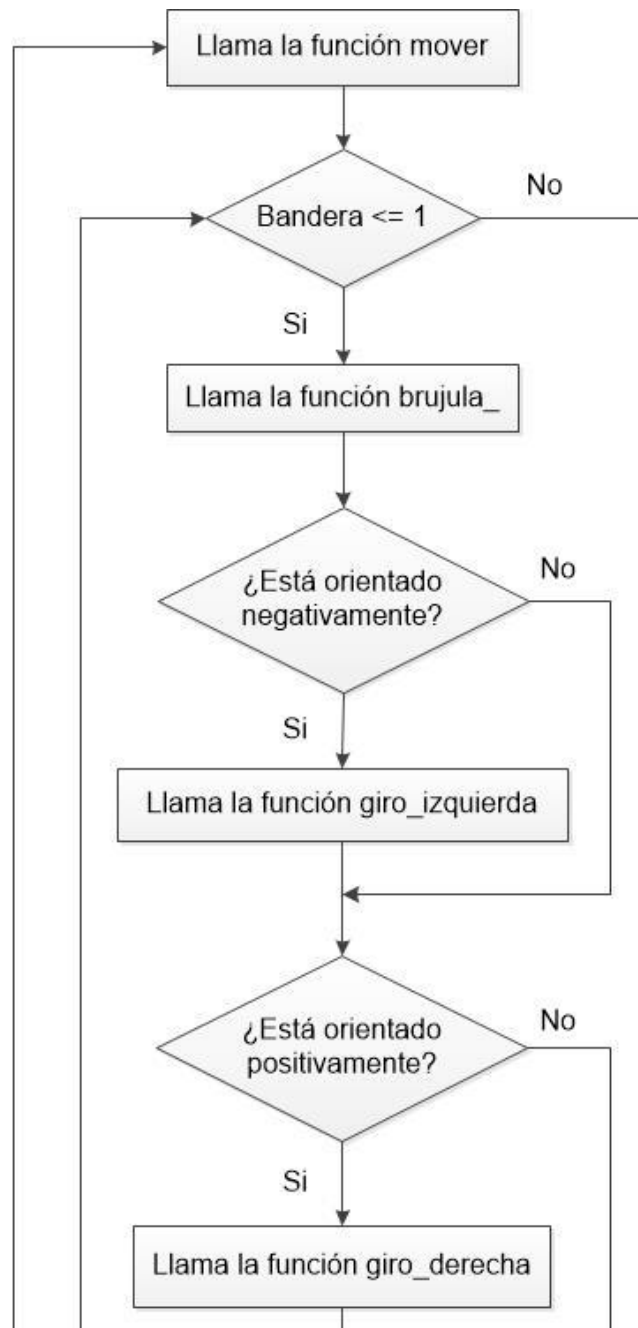


Fuente: Propia del autor.

#### 3.6.4.4 Caso 4

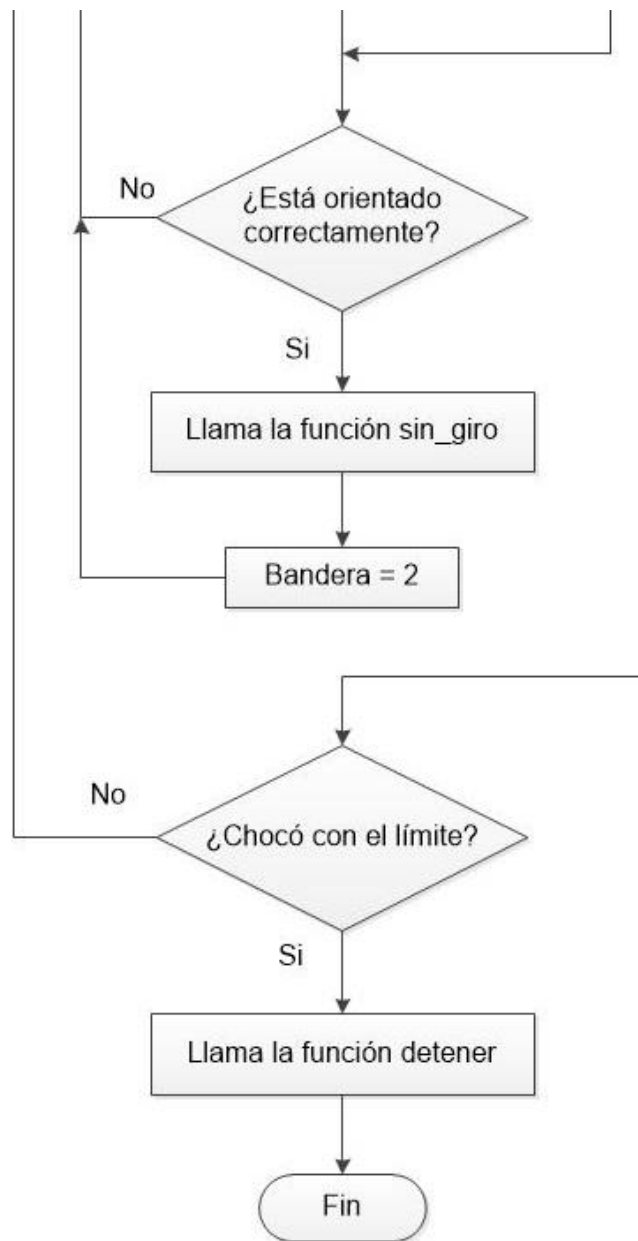
El último caso está conformado por las instrucciones para hacer la subtarea de transporte del objeto encontrado, las cuales deben ser ejecutadas por dos robots (el que encontró el objeto y el que se desplazó a ayudarlo). Según el algoritmo, los robots inician su desplazamiento y giran hasta quedar con una orientación inversa a la orientación inicial, es decir hasta que el ángulo sentido por la brújula esté cerca o sea  $224^\circ$ , según el ejemplo anteriormente expuesto. Las sentencias para determinar el giro del robot también deben ser ajustadas por el programador. Seguido al giro de los robots con el objeto, éstos se desplazan en línea recta hasta chocar de frente con el límite del área. En la figura 76 y 77 se presenta el diagrama de flujo de la subtarea de transporte, y en la figura 78 el ejemplo de los movimientos de los robots.

Figura 76. Diagrama de flujo de la subtarea de transporte parte 1.



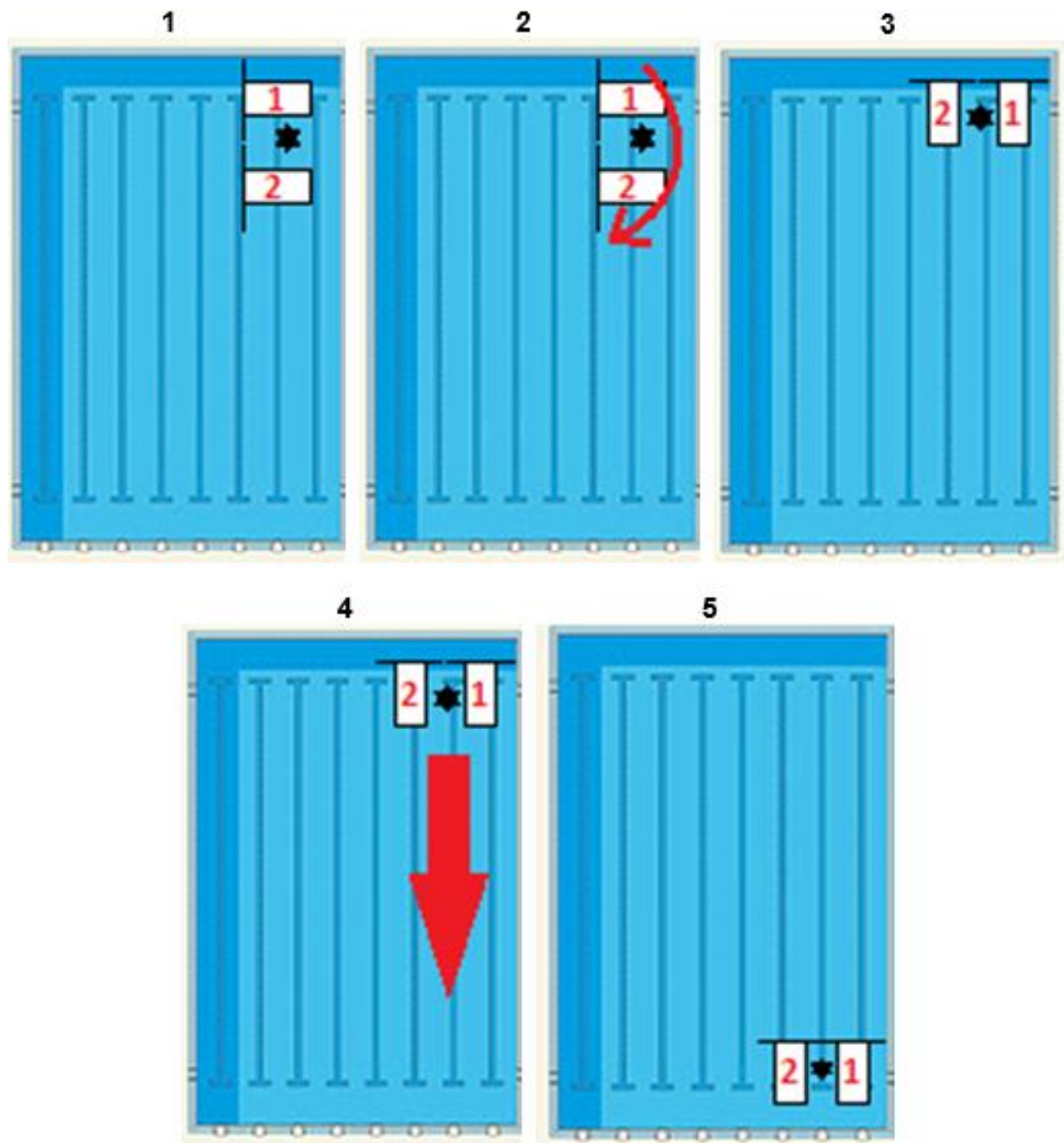
Fuente: Propia del autor.

Figura 77. Diagrama de flujo de la subtarea de transporte parte 1.



Fuente: Propia del autor.

Figura 78. Funcionamiento del algoritmo de transporte.



Fuente: Propia del autor.

## 4. CAPITULO. DISEÑO DE HARDWARE Y SOFTWARE

### 4.1 TARJETA DE DESARROLLO

La tarjeta de desarrollo cumple la tarea de procesar las señales de los sensores y enviar las señales a los actuadores para lograr funciones de movimiento, comunicación, esquivar obstáculos, entre otros. Es necesario que la tarjeta de desarrollo se acomode a los requerimientos de hardware como por ejemplo pines de entrada y salida digitales, lectura análoga, interfaces de comunicación, pines con salida PWM, velocidad de procesamiento y memoria. Además, que el software o interfaz de programación de la tarjeta sea sencillo de usar, que cuente con librerías y con información suficiente para programarla fácilmente.

En la tabla 10 se presentan las ventajas y desventajas de algunas tarjetas de desarrollo nombradas en el capítulo 1, en la sección **Componentes electrónicos** del marco teórico y que fueron de utilidad al seleccionar la tarjeta para el proyecto. Todas las tarjetas comparadas cuentan con un microcontrolador de 32 bits, que permite hacer cálculos más rápidos con números más grandes (0h a FFFFFFFFh), además los periféricos que posee son de mejor resolución o calidad (más avanzados).

Tabla 10. Tabla comparativa de algunas tarjetas de desarrollo.

Tarjeta de desarrollo	Ventajas	Desventajas
LaunchPad MSP-EXP432P401R de Texas Instruments	<ul style="list-style-type: none"><li>- Bajo consumo energético</li><li>- Económico</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- No se consigue en el mercado nacional</li><li>- Baja velocidad de procesamiento (48 MHz)</li></ul>
ChipKIT uC32 de Microchip Technology and Digilent Inc.	<ul style="list-style-type: none"><li>- Media velocidad de procesamiento (80 MHz)</li><li>- Compatible con ejemplos de Arduino</li><li>- Compatible con Shields de Arduino</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Costo elevado</li></ul>
STM32F4DISCOVERY de STMicroelectronics	<ul style="list-style-type: none"><li>- Alta velocidad de procesamiento (168 MHz)</li><li>- Posee acelerómetro de tres ejes y microfono digital</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Poca información para su programación</li></ul>



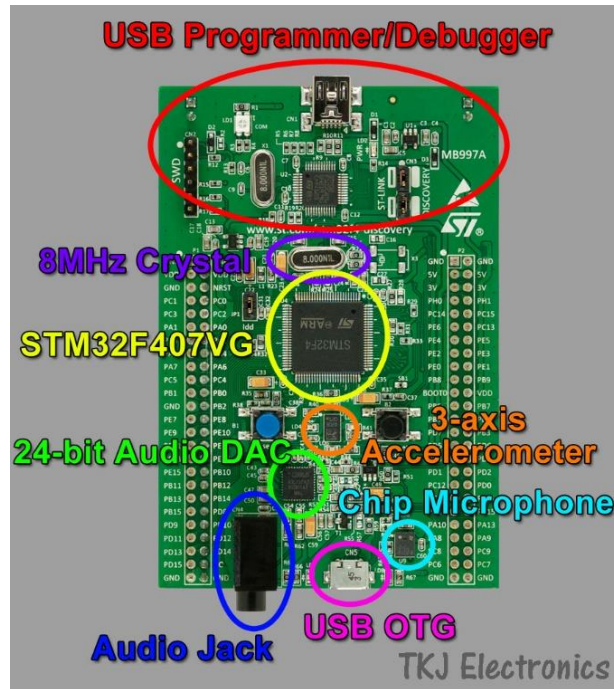
STM32F3DISCOVERY de STMicroelectronics	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Media velocidad de procesamiento (72 MHz)</li> <li>- Posee acelerómetro, brújula y giroscopio de tres ejes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poca información para su programación</li> <li>- No se consigue en el mercado nacional</li> </ul>
FRDM-K64F de Freescale Semiconductor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta velocidad de procesamiento (120 MHz)</li> <li>- 1 MB de memoria</li> <li>- Posee acelerómetro y magnetómetro</li> <li>- Puerto Ethernet</li> <li>- Ranura para tarjeta SD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo elevado</li> </ul>
FRDM-KL43Z de Freescale Semiconductor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posee sensor capacitivo de contacto</li> <li>- Posee acelerómetro y magnetómetro</li> <li>- Posee pantalla LCD de 4 segmentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se consigue en el mercado nacional</li> <li>- Baja velocidad de procesamiento (48 MHz)</li> </ul>

Fuente: Propia del autor.

La tarjeta electrónica de desarrollo seleccionada para el proyecto fue la STM32F4DISCOVERY basada en la familia de microcontroladores de 32 bits STM32 y perteneciente al grupo de alto rendimiento que ofrece la compañía STMicroelectronics. La tarjeta (figura 79) cuenta con el microcontrolador STM32F407VGT6 de 32 bits que asegura un funcionamiento en tiempo real para aplicaciones de procesamiento de señales análogas o digitales con bajo consumo energético. Cuenta con 100 pines de conexión, 1 MB de memoria flash, 192 KB de RAM, canales A/D de 12 bits, canales D/A de 12 bits, un gran número de interfaces de comunicación y además incorpora un sensor tipo acelerómetro de tres ejes (LIS302DL o LIS3DSH) y un sensor de audio tipo micrófono digital (MP45DT02).

STMicroelectronics ofrece una tarjeta de desarrollo más apropiada para el proyecto debido a que integra un sensor tipo acelerómetro y brújula magnética (LSM303DLHC), y un sensor tipo giroscopio de tres ejes (L3GD20), sin embargo se decidió trabajar con la STM32F4DISCOVERY por que fue la única que se encontró en el mercado nacional y tiene mejores características en velocidad de procesamiento, memoria y desempeño.

Figura 79. Tarjeta de desarrollo.



Fuente: JESPERSEN, Thomas. Review: STM32F4-DISCOVERY.

#### 4.1.1 Software de programación

Hay diferentes softwares que permiten programar las tarjetas de desarrollo de STMicroelectronics y son conocidos como compiladores ya que traducen un programa escrito en un lenguaje de programación a lenguaje de maquina propio del microcontrolador. Algunos de estos compiladores son IAR Embedded Workbench® para ARM (EWARM) por IAR Systems, Microcontroller Development Kit para ARM (MDK-ARM) por Keil™, TrueSTUDIO® por Atollic, TASKING VX-toolset para ARM Cortex por Altium y mikroC PRO para ARM por MikroElectronica<sup>73</sup>.

<sup>73</sup> STMICROELECTRONICS. UM1467 User Manual. Getting started with software and firmware environments for the STM32F4DISCOVERY Kit. [en línea]. Septiembre 2011. [consultado 24 de Septiembre de 2015]. p. 1-46. Disponible en: <[http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user\\_manual/DM00037368.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00037368.pdf)>.

Los compiladores EWARM, MDK-ARM, TrueSTUDIO y TASKING permiten programar en lenguaje de máquina, sin embargo STMicroelectronics brinda a los usuarios un archivo con las librerías y ejemplos necesarios para hacer el uso del software más cómodo, sencillo y rápido. Aun así, con las actualizaciones de cada compilador, la información encontrada no es lo suficientemente clara y demanda un grado alto de complejidad al programar, además de que cada software tiene limitaciones de uso en sus versiones de prueba. La tabla 11 muestra las limitaciones de la versión de prueba del compilador MDK-ARM.

Tabla 11. Limitaciones versión de prueba compilador MDK-ARM.

<b>LIMITACIONES VERSIÓN DE PRUEBA COMPILADOR MDK-ARM</b>
Los programas que generan más de 32 Kbytes de código y datos no compilarán, ensamblarán, o enlazarán.
El depurador soporta programas de 32 Kbytes o más pequeños.
El compilador no crea un listado de desmontaje del código de máquina generado. Las opciones -s, -asm, y -interleave compiler command-line están desactivadas. Los proyectos no compilarán con Target -> lista -> C Compiler Listing enabled.
El compilador y ensamblador no generan código o datos independientes de la posición. Las opciones de comando de línea --apcs / ropi / rwpi / pic / pid del compilador y ensamblador están desactivadas.
El ensamblador y enlazador crean objetos de formato de salida simbólica (Symbolic Output Format) que no pueden estar vinculados con las utilidades de vinculación de terceros. Herramientas con licencia completa generan archivos estándar ELF/DWARF que se pueden usar con utilidades de terceros.

Fuente: ARMKEIL. Limitations.

En la tabla 12 se presentan las ventajas y desventajas de los compiladores que se pueden usar para programar la tarjeta de desarrollo seleccionada.

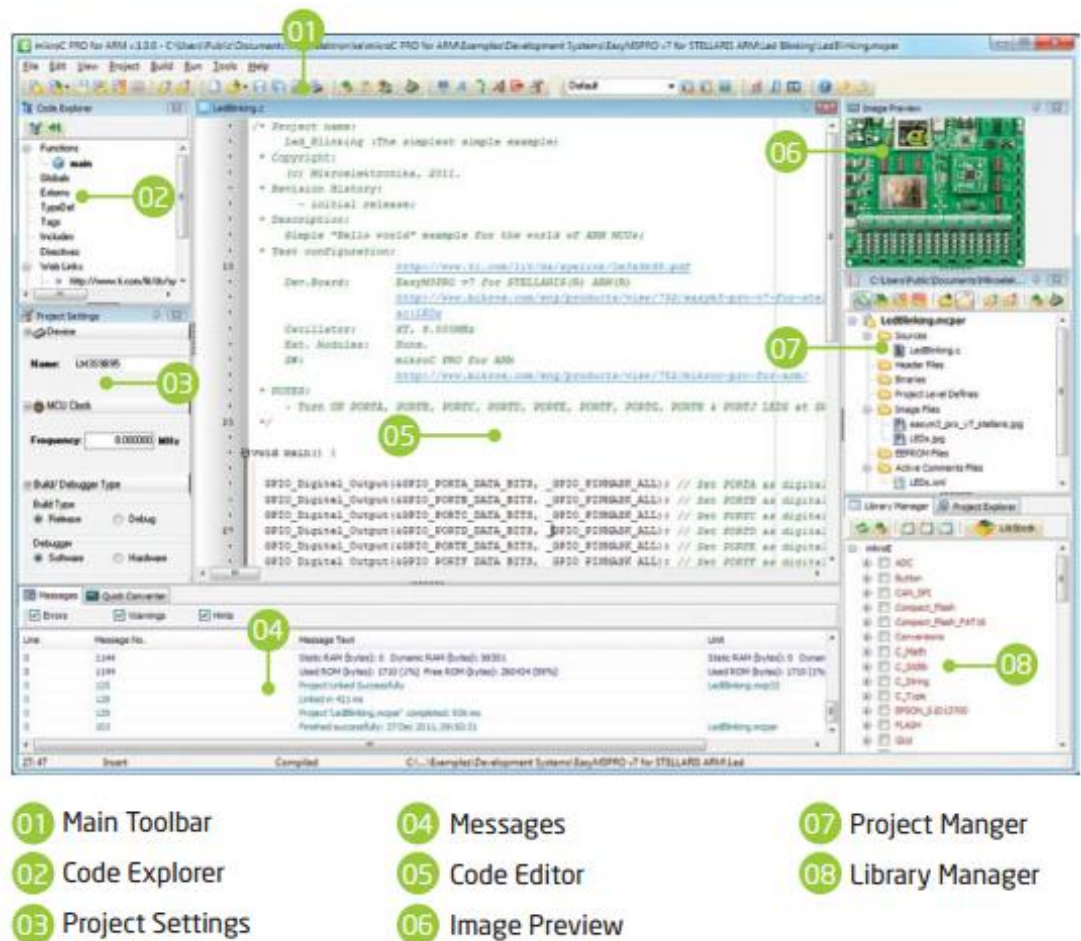
Tabla 12. Tabla comparativa compiladores.

<b>Compilador</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
EWARM	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran número de ejemplos y documentos guía</li> <li>- Soporta gran numero de tarjetas de desarrollo</li> <li>- Cuenta con licencias de límite de tamaño de programa o límite de tiempo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hay límite de uso por 30 días o límite de tamaño de programa de 32 Kb y no incluye el uso de librerías</li> <li>- Requiere un conocimiento medio de programación en C/C++</li> </ul>
MDK-ARM	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite la programación de un gran numero de tarjetas y kits de desarrollo</li> <li>- Cuenta con herramientas para la configuracion de los distintos parametros de las tarjetas de desarrollo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Límite de 32 Kb de código y datos</li> <li>- Cuenta con pocos ejemplos</li> <li>- Requiere un conocimiento alto de programación en C/C++</li> </ul>
TrueSTUDIO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No hay límites de tamaño de código</li> <li>- Soporta 2600 dispositivos</li> <li>- Cuenta con proyectos de ejemplos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cuenta con soporte técnico y herramientas para el análisis de código para la versión PRO</li> <li>- Requiere un conocimiento alto de programación en C/C++</li> </ul>
TASKING VX-toolset	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Genera código con el menor tamaño posible</li> <li>- Cuenta con estandares industriales para un desarrollo más estable</li> <li>- Ambiente de programación basado en Eclipse IDE</li> <li>- Configuración por bloques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soporta una cantidad no tan alta de tarjetas de desarrollo</li> <li>- Requiere un conocimiento alto de programación en C/C++</li> <li>- Demanda una configuración extensa para su funcionamiento</li> </ul>
mikroC PRO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posee librerías compatibles con las tarjetas de desarrollo STM32 y TIVA.</li> <li>- Requiere un conocimiento básico de programación en C/C++</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se ve limitado a la programación de las tarjetas STM32 y TIVA</li> <li>- Límite de 32 Kb de código y datos</li> </ul>

Fuente: Propia del autor.

Aunque el compilador mikroC PRO para ARM cuenta con limitaciones similares a los demás, este software ofrece ventajas de programación al tener librerías propias y una herramienta de ayuda con bastantes ejemplos. El lenguaje de programación que se usa es C, su interfaz (figura 80) es de fácil uso y tiene herramientas como USART Terminal, UDP Terminal, LCD Custom Character, GLCD Bitmap Editor, Seven Segment Editor, entre otras, que ayudan en la generación de código (para pantallas LCD y GLCD) o sirven para establecer comunicación entre la computadora y la tarjeta. La compañía MikroElektronika desarrolló otros dos compiladores para programar las tarjetas STM32 y Stellaris, una es mikroBASIC PRO y la otra mikroPASCAL PRO, aunque por la comodidad y las características que tiene se decidió usar el compilador mikroC PRO.

Figura 80. Interfaz mikroC PRO for ARM.



Fuente: EMCU. What should I use to develop on STM32?

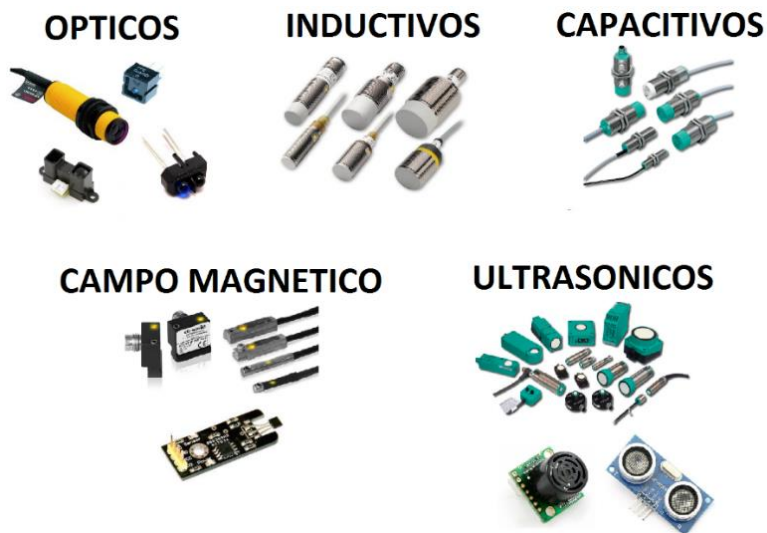
## 4.2 SENSORES

La metodología de cooperación propuesta demanda el uso de algunos sensores para facilitar el cumplimiento de las subtareas y con esto el cumplimiento de la tarea de recolección. Es necesario que cada robot incorpore sensores para la detección de objetos, esquivar obstáculos, saber su localización y orientación.

### 4.2.1 Sensor de proximidad

Un sensor de proximidad es usado con el objetivo de proporcionar información sobre los objetos presentes en el ambiente donde el robot se desplazará<sup>74</sup>. Dentro del conjunto de sensores de proximidad se encuentran los sensores inductivos, capacitivos, de campo magnético (efecto Hall), ultrasónicos y ópticos como se ve en la figura 81, cada uno con características que se ajustan a diferentes ambientes (industrial o robótica) y tareas (detectar objetos, esquivar objetos o medir distancia).

Figura 81. Sensores de proximidad.



Fuente: Propia del autor.

---

<sup>74</sup> SENSORES. [en línea]. [consultado 27 de Septiembre de 2015]. p. 1-21. Disponible en: <<http://www.isa.cie.uva.es/~maria/sensores.pdf>>

Entre los sensores más usados para tareas de detección de objetos o medición de distancia en robótica están los sensores de proximidad ópticos y ultrasónicos. Ambos sensores integran una fuente emisora, una receptora y un circuito electrónico que trata la señal para transformarla en salida digital o analógica, sin embargo los sensores ópticos hacen uso de señales infrarrojas mientras que los sensores ultrasónicos usan señales de ultrasonido. En la tabla 13 se encuentran algunas características de estos dos sensores de proximidad.

Tabla 13. Características de los sensores de proximidad (Óptico y ultrasónico).

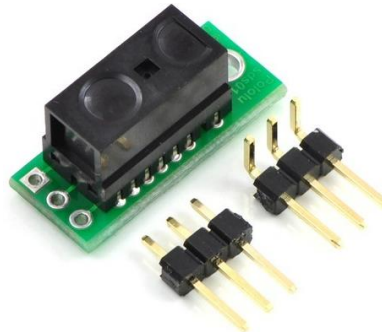
<b>Sensor óptico</b>	<b>Sensor ultrasónico</b>
Señal de salida analógica o digital	Señal de salida digital proporcional al rango
Usa fuente emisora y receptora para medición continua	Usa fuente emisora y receptora aparte o integrada con activación por el usuario (sin medición continua)
Problemas con la alineación precisa	Problemas con el ángulo de incidencia de la onda sobre el objeto
Detección de objetos de forma directa	Detección de objetos dentro del cono de ultrasonido
Problemas con la luz ambiente o artificial (requiere filtro)	Problemas con los cambios en el ambiente (temperatura, densidad del aire, falsos ecos)

Fuente: María. Sensores.

Teniendo en cuenta la información de la tabla 13 se decide incorporar un par de sensores de proximidad ópticos por robot para la detección de los objetos, los

cuales tienen señal de salida digital y un rango de medición de 0,5 cm a 15 cm. El sensor usado es el GP2Y0D815Z0F<sup>75</sup> fabricado por la empresa japonesa SHARP que se ve en la figura 82, tiene un peso de 1,4 gr con una frecuencia de muestreo de 390 Hz, alimentado a una tensión entre 2,7 V y 6,2 V y un consumo de corriente de 5 mA.

Figura 82. Sensor SHARPGP2Y0D815Z0F.



Fuente: POLOLU. New product: Sharp 15cm GP2Y0D815Z0F digital distance sensor

#### 4.2.2 Sensor de contacto

Este sensor es utilizado para obtener información de cuando un robot entra en contacto con un objeto que está en el ambiente. Su principal implementación es en la robótica de manipuladores y se distinguen dos tipos de sensores, los digitales y los análogos. Cuando un robot o manipulador necesita conocer la presencia o ausencia de un objeto se implementan sensores de contacto digital, pero si se necesita saber además de la presencia, la fuerza con la que se manipula el objeto entonces se usa un sensor de contacto análogo<sup>76</sup> (figura 83).

---

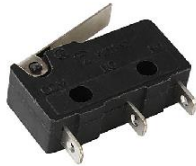
<sup>75</sup> SHARP. GP2Y0D815Z0F.[en línea]. [consultado 29 de Septiembre de 2015]. p. 1-8. Disponible en: <[http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0d815z\\_e.pdf](http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0d815z_e.pdf)>

<sup>76</sup> SENSORES. Op. Cit., p. 17.

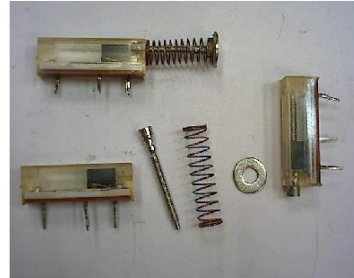


Figura 83. Sensor digital y análogo.

### **Sensor digital (interruptor)**



### **Sensor análogo (resistencia lineal + resorte)**



Fuente: Propia del autor.

Además de los sensores de proximidad ópticos, se integran al desarrollo del proyecto un par de sensores de contacto digitales tipo interruptor. Estos sensores son usados para saber si hay algún objeto de frente y así poder cambiar la dirección de la trayectoria si se choca con éste. Puede ser el borde del área de trabajo o un objeto muy pesado. El uso de sensores de contacto puede garantizar un mayor reconocimiento del área y ayuda a evitar a que el robot quede encerrado en un espacio, pudiendo perder la estabilidad al chocar durante el avance de la subtask de exploración.

#### **4.2.3 Sensor de localización**

Un sensor de localización es usado para realizar un seguimiento de la posición y orientación de un robot. Los sensores de localización pertenecen al grupo de sensores de medida absoluta ya que la información de la medida es con respecto a un sistema de referencia fijo. Los sensores más conocidos y usados con el propósito de conocer la localización de un robot son el GPS y la brújula, los cuales proporcionan información de la posición y la orientación respectivamente<sup>77</sup>.

---

<sup>77</sup> SENSORES PARA ROBOTS MOVILES. [en línea]. [consultado 30 de Septiembre de 2015]. p. 4-44.

#### 4.2.3.1 Módulo GPS

El módulo GPS (figura 84) no es considerado un sensor porque recibe la información de satélites, sin embargo el sistema GPS completo (figura 85) es considerado un sensor de medida absoluta que proporciona la información de la posición geográfica de un dispositivo<sup>78</sup>. Este módulo es usado en robótica debido a que es el único que da una medida de la posición en cualquier entorno, sin embargo presenta un error de precisión que varía con respecto a la robustez del módulo, entre más robusto mayor la precisión de la medida, pero mayor es el costo.

Figura 84. Módulo GPS.



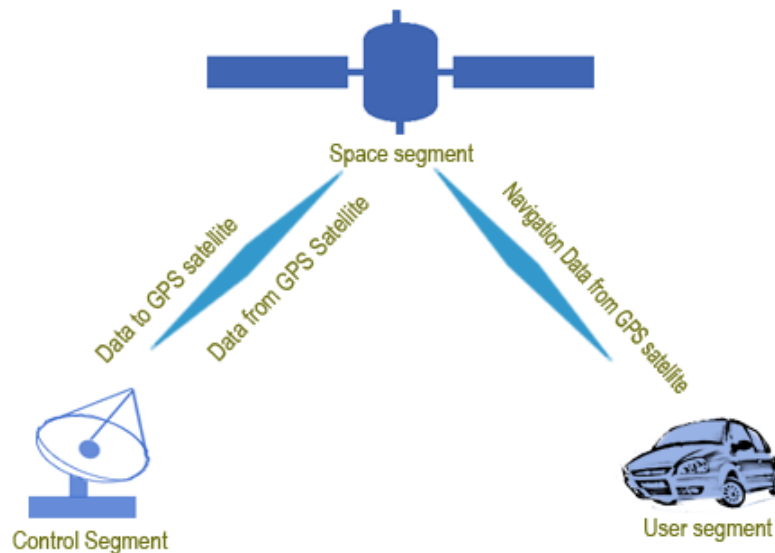
Fuente: MICROS PARALLAX. ¿Cómo puedo ...? Conocer mis datos geográficos con el "módulo GPS"

---

Disponible en: <<http://www.iit.upcomillas.es/alvaro/teaching/Clases/Robots/teoria/Sensores%20y%20actuadores.pdf>>

<sup>78</sup> Ibid., p. 19.

Figura 85. Sistema GPS.



Fuente: ENGINEERSGARAGE. GPS (Global Positioning System).

La empresa u-blox desarrolla una serie de productos inalámbricos para los mercados industriales y de automatización, y entre su gama de productos se encuentran módulos de sistema de navegación global por satélite o GNSS (Global Navigation Satellite System) de estándar y alta precisión. En el mercado nacional se encuentra el módulo GPS GY-GPS6MV2 que integra la tarjeta electrónica u-blox NEO-6M y cuenta con una antena cerámica (figura 86). Este módulo posee interfaz de comunicación serial para la lectura de los datos enviados por los satélites y facilitar su uso en aplicaciones robóticas.

Figura 86. Módulo GPS con antena cerámica.



Fuente: ELECTROTEC. Tutorial Arduino #7 - Uso del módulo GPS6MV2.

La tabla 14 muestra algunas características del módulo como método de transmisión, protocolo de salida de datos y configuración. Debido a que es el único módulo de posicionamiento que se encuentra en el mercado se decidió usarlo teniendo en cuenta las desventajas que presenta como por ejemplo el error de posición.

Tabla 14. Características módulo GPS.

<b>CARACTERISTICAS MODULO GPS GY-GPS6MV2</b>
Voltaje de operación entre 3.3 V y 6 V
Memoria EEPROM con una pila de botón para mantener los datos luego de apagar el modulo
LED indicador de estado de conexión con los satélites
Envío de información mediante interfaz serial a 9600 baudios por defecto, pero es configurable desde 4800 a 115200 baudios
Exactitud de posición de 2 metros
Tres modos de funcionamiento, dos modos continuos (modo de máximo desempeño y modo eco) y uno intermitente (modo ahorro de energía)
Datos de salida en protocolo NMEA 0183
Configuración mediante software u-cener para Windows

Fuente: ADDICORE. NEO-6M GPS Module with EEPROM.

#### **4.2.3.1.1 Protocolo NMEA 0183**

El protocolo NMEA 0183 es un estándar que define una interfaz eléctrica y protocolo de datos para la comunicación entre instrumentación marina y receptores GPS. Fue definido y está controlado por la organización National Marine Electronics Association (NMEA). Los dispositivos con interfaz eléctrica NMEA 0183 son diseñados como transmisores y receptores que emplean una interfaz serial asíncrona y el protocolo de datos se basa en la transmisión de sentencias. Cada sentencia de datos inicia con un signo "\$", finaliza con un

<CR><LF> (carriage return o retorno de carro, y line feed o avance de línea) y usa caracteres tipo ASCII. Hay tres tipos básicos de sentencias: sentencias de transmisión, sentencias de propiedades y sentencias de consulta<sup>79</sup>.

En los receptores GPS como el GY-GPS6MV2 los mensajes de salida se muestran en la tabla 15 y pertenecen al tipo de sentencia de propiedades del dispositivo.

Tabla 15. Mensajes de salida.

SENTENCIA NMEA	DESCRIPCION
GGA	Global positioning system fixed data (Dato fijo del sistema de posicionamiento global)
GLL	Geographic position - latitude/longitude (Posición geográfica – latitud/longitud)
GSA	GNSS DOP and active satellites (GNSS dilución de la precision y satelites activos)
GSV	GNSS satellites in view (GNSS satélites en vista)
RMC	Recommended minimum specific GNSS data (Datos específicos mínimos recomendados GNSS)
VTG	Course over ground and ground speed (Curso sobre la tierra y velocidad de avance)

Fuente: U-BLOX. Protocol Specification.

Según Betke<sup>80</sup>, la información de cada registro se distribuye como se muestra en la figura 87 para el registro GGA, figura 88 para el registro GLL, figura 89 para el registro GSA, figura 90 para el registro GSV, figura 91 para el registro RMC y figura 92 para el registro VTG.

---

<sup>79</sup> BETKE, Klaus. The NMEA 0183 Protocol. [en línea]. Mayo 2000. [consultado 2 de Octubre de 2015]. p. 1-28. Disponible en: <<http://www.tronico.fi/OH6NT/docs/NMEA0183.pdf>>

<sup>80</sup>Ibid., p. 9 – 17.

Figura 87. Registro CGA

**GGA Global Positioning System Fix Data. Time, Position and fix related data for a GPS receiver**


\$--GGA,hhmmss.ss,llll.ll,a,yyyyy.yy,a,x,xx,x.x,x.x,M,x.x,M,x.x,xxxx\*hh

- 1) Time (UTC)
- 2) Latitude
- 3) N or S (North or South)
- 4) Longitude
- 5) E or W (East or West)
- 6) GPS Quality Indicator,  
0 - fix not available,  
1 - GPS fix,  
2 - Differential GPS fix
- 7) Number of satellites in view, 00 - 12
- 8) Horizontal Dilution of precision
- 9) Antenna Altitude above/below mean-sea-level (geoid)
- 10) Units of antenna altitude, meters
- 11) Geoidal separation, the difference between the WGS-84 earth ellipsoid and mean-sea-level (geoid), "-" means mean-sea-level below ellipsoid
- 12) Units of geoidal separation, meters
- 13) Age of differential GPS data, time in seconds since last SC104 type 1 or 9 update, null field when DGPS is not used
- 14) Differential reference station ID, 0000-1023
- 15) Checksum

Fuente: BETKE, Klaus. The NMEA 0183 Protocol.

Figura 88. Registro GLL.

**GLL Geographic Position – Latitude/Longitude**


\$--GLL,llll.ll,a,yyyyy.yy,a,hhmmss.ss,A\*hh

- 1) Latitude
- 2) N or S (North or South)
- 3) Longitude
- 4) E or W (East or West)
- 5) Time (UTC)
- 6) Status A - Data Valid, V - Data Invalid
- 7) Checksum

Fuente: BETKE, Klaus. The NMEA 0183 Protocol.

Figura 89. Registro GSA.

## GSA GPS DOP and active satellites

1 2 3                      14 15 16 17 18  
| | |                      | | | | |

\$--GSA, a, a, x, x, x, x, x, x, x, x, x, x, x, x, x, x.x, x.x, x.x\*hh

- ```

1) Selection mode
2) Mode
3) ID of 1st satellite used for fix
4) ID of 2nd satellite used for fix
...
14) ID of 12th satellite used for fix
15) PDOP in meters
16) HDOP in meters
17) VDOP in meters
18) Checksum

```

Fuente: BETKE, Klaus. The NMEA 0183 Protocol.

Figura 90. Registro GSV.

**GSV    Satellites in view**

```

      1 2 3 4 5 6 7      n
      | | | | | | |
$--GSV,x,x,x,x,x,x,x,...*hh

```

- 1) total number of messages
  - 2) message number
  - 3) satellites in view
  - 4) satellite number
  - 5) elevation in degrees
  - 6) azimuth in degrees to true
  - 7) SNR in dB
- more satellite infos like 4)-7)
- n) Checksum

Fuente: BETKE, Klaus. The NMEA 0183 Protocol.

Figura 91. Registro RMC.

**RMC Recommended Minimum Navigation Information**

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |

\$--RMC,hhmmss.ss,A,llll.ll,a,yyyy.yy,a,x.x,x.x,xxxx,x.x,a\*hh

- 1) Time (UTC)
- 2) Status, V = Navigation receiver warning
- 3) Latitude
- 4) N or S
- 5) Longitude
- 6) E or W
- 7) Speed over ground, knots
- 8) Track made good, degrees true
- 9) Date, ddmmyy
- 10) Magnetic Variation, degrees
- 11) E or W
- 12) Checksum

Fuente: BETKE, Klaus. The NMEA 0183 Protocol.

Figura 92. Registro VTG.

**VTG Track Made Good and Ground Speed**

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |

\$--VTG,x.x,T,x.x,M,x.x,N,x.x,K\*hh

- 1) Track Degrees
- 2) T = True
- 3) Track Degrees
- 4) M = Magnetic
- 5) Speed Knots
- 6) N = Knots
- 7) Speed Kilometers Per Hour
- 8) K = Kilometres Per Hour
- 9) Checksum

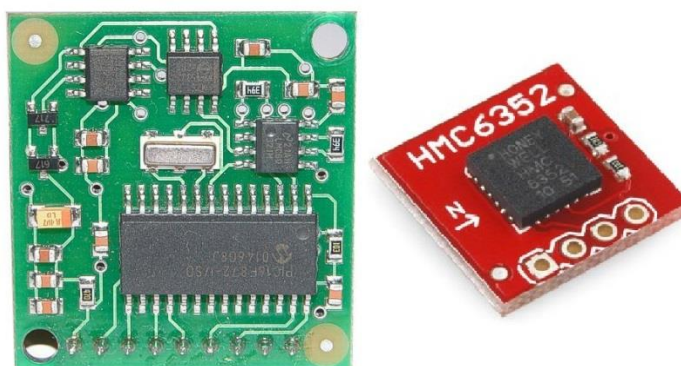
Fuente: BETKE, Klaus. The NMEA 0183 Protocol.



#### 4.2.3.2 Brújula magnética

La brújula magnética (figura 93) es un sensor que mide el campo magnético de la tierra para obtener la orientación de un robot. Puede medir el campo magnético en dos o tres dimensiones y además puede ser analógica o digital. Tiene como ventaja fundamental que mide la orientación en prácticamente cualquier lugar del mundo, sin embargo es sensible a los campos magnéticos externos y a los elementos metálicos que se encuentre muy cerca<sup>81</sup>. Estos sensores presentan un error con respecto al dato real que genera una incorrecta navegación, pero puede ser corregido. Así como en el módulo GPS, la precisión varía con respecto a la robustez del sensor y de igual forma el precio, entre más robusto, mejor la medida y más costoso.

Figura 93. Brújula magnética analógica y digital.



Fuente: Propia del autor.

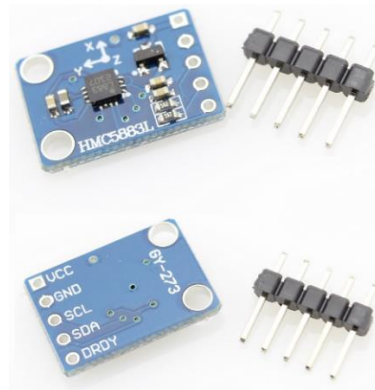
La empresa estadounidense Honeywell fabrica una brújula digital de tres ejes (HMC5883L) que está integrada en la tarjeta electrónica GY-273 (ver figura 94) encontrada en el mercado nacional y que tiene un bus serial I2C (Inter-Integrated Circuit) para la configuración y lectura de datos. El circuito integrado utiliza tecnología de magnetorresistencia anisotrópica de Honeywell (AMR) que ofrece ventajas sobre otras tecnologías de sensores magnéticos. Está diseñado para medir la dirección y magnitud del campo magnético terrestre para aplicaciones de telefonía móvil, sistemas de auto navegación y dispositivos de navegación

---

<sup>81</sup>SENSORES PARA ROBOTS MOVILES. Op. cit., p. 20.

personal<sup>82</sup>. El sensor se integró al proyecto luego de estudiar sus características y también, por ser el más comercializado en el mercado nacional.

Figura 94. Brújula digital GY-273.



Fuente: Propia del autor.

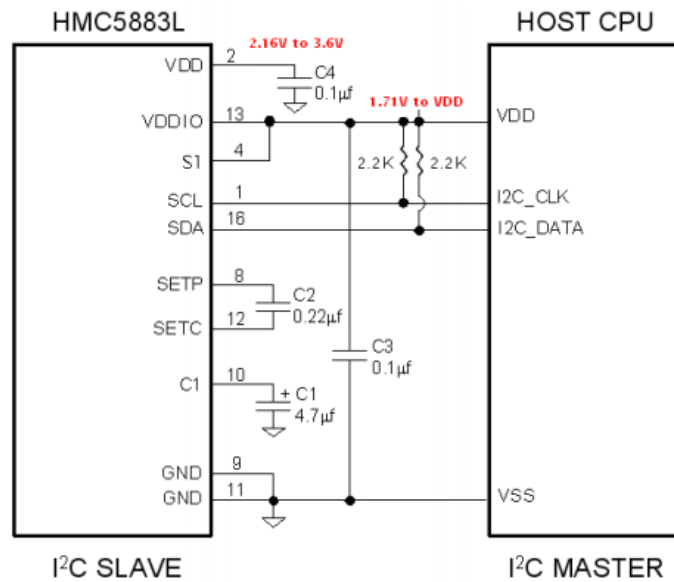
El sensor HMC5883L tiene dos modos de alimentación. El modo de alimentación sencillo que es usado para las operaciones internas, y el modo de alimentación dual que es usado para la interfaz I/O que posee. En la figura 95 se ven los diseños de referencia que ofrece el fabricante para la alimentación y conexión del bus serial I2C, donde la tarjeta electrónica GY-273 usa el diseño para el modo de alimentación dual. Por otra parte, el bus I2C que tiene el sensor permite la conexión para el control por parte de un dispositivo maestro. Cuenta con una dirección serial de 7 bits, soporta modo de transmisión estándar y rápida (100 KHz y 400 KHz respectivamente), pero requiere de resistencias en configuración pull-up para su correcto funcionamiento.

---

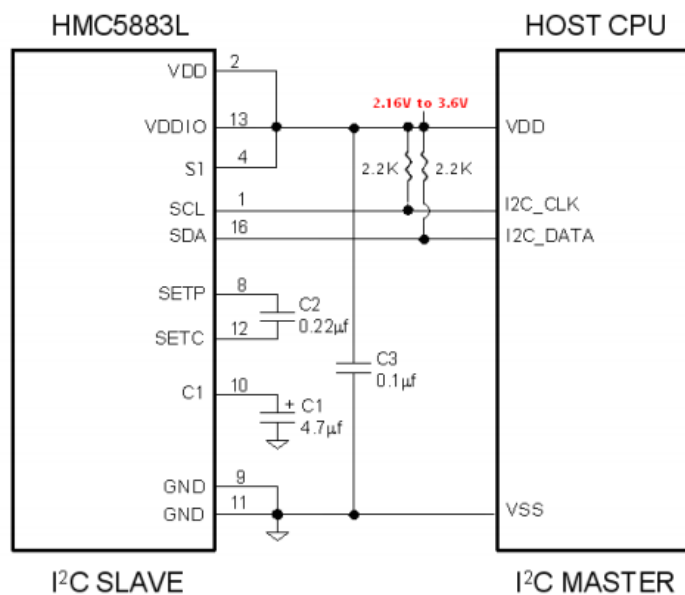
<sup>82</sup> HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L. [en línea]. Febrero 2013. [consultado 6 de Octubre de 2015]. p. 1-20. Disponible en: <[http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense\\_Brochures-documents/HMC5883L\\_3-Axis\\_Digital\\_Compass\\_IC.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf)>

Figura 95. Diseño de alimentación y conexión del bus serial I2C.

#### DUAL SUPPLY REFERENCE DESIGN



#### SINGLE SUPPLY REFERENCE DESIGN



Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

En la tabla 16 se muestran algunas características que se tienen en cuenta para el desarrollo del proyecto, la configuración y obtención de los datos medidos.

Tabla 16. Características brújula digital.

| <b>CARACTERISTICAS BRUJULA DIGITAL GY-273</b>                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Voltaje de alimentación entre 3 y 5 V con bajo consumo de corriente                                                       |
| Interfaz de comunicación serial digital I2C                                                                               |
| Pin de estado (DRDY) para monitoreo de la lectura de datos                                                                |
| Tres modos de funcionamiento, modo de medición continua, única y modo inactivo                                            |
| Controlado y configurado vía registros. Tres de configuración que se pueden leer o escribir, y diez para lectura de datos |

Fuente:HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

#### 4.2.3.2.1 Registros

El HMC5883L es controlado y configurado vía registros de 8 bits que pueden ser leídos o escritos con un dispositivo maestro por medio de la interfaz I2C. La dirección de localización, nombre y modo de acceso de todos los registros se presentan en la tabla 17.

Tabla 17. Registros de memoria HMC5883L.

| <b>Dirección de localización</b> | <b>Nombre</b>              | <b>Modo de acceso</b> |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 00                               | Configuration Register A   | Lectura / Escritura   |
| 01                               | Configuration Register B   | Lectura / Escritura   |
| 02                               | Mode Register              | Lectura / Escritura   |
| 03                               | Data Output X MSB Register | Lectura               |
| 04                               | Data Output X LSB Register | Lectura               |
| 05                               | Data Output Z MSB Register | Lectura               |
| 06                               | Data Output Z LSB Register | Lectura               |
| 07                               | Data Output Y MSB Register | Lectura               |

|    |                            |         |
|----|----------------------------|---------|
| 08 | Data Output Y LSB Register | Lectura |
| 09 | Status Register            | Lectura |
| 10 | Identification Register A  | Lectura |
| 11 | Identification Register B  | Lectura |
| 12 | Identification Register C  | Lectura |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

El sensor usa puntos de localización para indicar cual dirección de registro se leerá o escribirá. Esos puntos de localización son enviados desde un dispositivo maestro, donde la dirección de 7 bits del dispositivo esclavo (GY-273) es 0011110X (0x1E), siendo X el bit de identificación de lectura o escritura (bit R/W). Para leer el sensor, el bit R/W debe ser 1 y para escribir debe ser 0. La dirección para leer es 00111101 (0x3D) y para escribir es 00111100 (0x3C)<sup>83</sup>.

- Configuration Register A: Este es uno de los tres registros de configuración usado para ajustar la medición y la velocidad de salida de datos<sup>84</sup>. En la tabla 18 se muestra la ubicación de los bits y el valor por defecto de cada uno, y en la tabla 19 se muestra la descripción de cada bit.

Tabla 18. Configuration register A.

| <b>CRA7</b> | <b>CRA6</b> | <b>CRA5</b> | <b>CRA4</b> | <b>CRA3</b> | <b>CRA2</b> | <b>CRA1</b> | <b>CRA0</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| (0)         | MA1 (0)     | MA0 (0)     | DO2 (0)     | DO1 (0)     | DO0 (0)     | MS1 (0)     | MS0 (0)     |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

---

<sup>83</sup> Ibid., p. 11.

<sup>84</sup> Ibid., p. 12.

Tabla 19. Descripción de los bits.

| LOCALIZACION | NOMBRE    | DESCRIPCION                                                                                                            |
|--------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CRA7         | CRA7      | Bit reservado para futura función. Se pone 0.                                                                          |
| CRA6 a CRA5  | MA1 a MA0 | Selección de número de muestras en promedio por salida de medición.<br>00 = 1; 01 = 2; 10 = 4; 11 = 8                  |
| CRA5 a CRA2  | DO2 a DO0 | Bits para establecer la frecuencia de escritura de los datos en los registros de salida.                               |
| CRA1 a CRA0  | MS1 a MS0 | Bits para definir el flujo de medición del sensor, específicamente para incorporar o no una polarización a la medición |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

La tabla 20 muestra todos los rangos de salida seleccionables para el modo de medición continua. Además, según la hoja de datos que ofrece Honeywell<sup>85</sup>, otros rangos de salida con frecuencia máxima de 160 Hz pueden ser alcanzados por el monitoreo del pin DRDY en modo de medición única. Por otra parte, la tabla 21 muestra las posibles configuraciones del modo de medición.

Tabla 20. Salida en modo de medición continua.

| DO2 | DO1 | DO0 | FRECUENCIA TIPICA DE SALIDA DE DATOS (Hz) |
|-----|-----|-----|-------------------------------------------|
| 0   | 0   | 0   | 0.75                                      |
| 0   | 0   | 1   | 1.5                                       |
| 0   | 1   | 0   | 3                                         |
| 0   | 1   | 1   | 7.5                                       |
| 1   | 0   | 0   | 15                                        |

---

<sup>85</sup> Ibid., p. 12.

|   |   |   |           |
|---|---|---|-----------|
| 1 | 0 | 1 | 30        |
| 1 | 1 | 0 | 75        |
| 1 | 1 | 1 | Reservado |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

Tabla 21. Modos de medición.

| MS1 | MS0 | MODO DE MEDICION                                                                                                                                                    |
|-----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0   | 0   | Medición normal. El dispositivo tiene un flujo normal de medición. Los pines positivo y negativo de la carga resistiva son dejados flotantes y con alta impedancia. |
| 0   | 1   | Polarización positiva para los ejes X, Y y Z. En esta configuración, una corriente positiva es forzada a través de la carga resistiva para los tres ejes.           |
| 1   | 0   | Polarización negativa para los ejes X, Y y Z. En esta configuración, una corriente negativa es forzada a través de la carga resistiva para los tres ejes.           |
| 1   | 1   | Configuración reservada.                                                                                                                                            |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

- Configuration Register B: Este registro de configuración es usado para ajustar la ganancia del dispositivo<sup>86</sup>. En la tabla 22 se muestra la ubicación de los bits y el valor por defecto de cada uno, y en la tabla 23 se muestra la descripción de cada bit.

---

<sup>86</sup> Ibid., p. 13.

Tabla 22. Configuration Register B.

| CRB7    | CRB6    | CRB5    | CRB4 | CRB3 | CRB2 | CRB1 | CRB0 |
|---------|---------|---------|------|------|------|------|------|
| GN2 (0) | GN1 (0) | GN0 (1) | (0)  | (0)  | (0)  | (0)  | (0)  |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

Tabla 23. Descripción de los bits.

| LOCALIZACION | NOMBRE    | DESCRIPCION                                                                                            |
|--------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CRB7 a CRB5  | GN2 a GN0 | Bits de configuración de la ganancia. La configuración de la ganancia es común para todos los canales. |
| CRB4 a CRB0  | 0         | Bits en estado bajo (0) para una correcta operación.                                                   |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

La tabla 24 muestra los valores nominales de ganancia que se pueden seleccionar.

Tabla 24. Valores nominales de ganancia.

| GN2 | GN1 | GN0 | RANGO RECOMENDADO DEL CAMPO DEL SENSOR | GANANCIA (LSb/Gauss) | RESOL. DIGITAL (mG/LSb) | RANGO DE SALIDA             |
|-----|-----|-----|----------------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 0   | 0   | 0   | $\pm 0.88$ Ga                          | 1370                 | 0.73                    | 0xF800–0x07FF (-2048–2047 ) |
| 0   | 0   | 1   | $\pm 1.3$ Ga                           | 1090                 | 0.92                    | 0xF800–0x07FF (-2048–2047 ) |
| 0   | 1   | 0   | $\pm 1.9$ Ga                           | 820                  | 1.22                    | 0xF800–0x07FF (-2048–2047 ) |
| 0   | 1   | 1   | $\pm 2.5$ Ga                           | 660                  | 1.52                    | 0xF800–0x07FF (-2048–2047 ) |
| 1   | 0   | 0   | $\pm 4.0$ Ga                           | 440                  | 2.27                    | 0xF800–0x07FF (-2048–2047 ) |



|   |   |   |              |     |      |                                |
|---|---|---|--------------|-----|------|--------------------------------|
| 1 | 0 | 1 | $\pm 4.7$ Ga | 390 | 2.56 | 0xF800–0x07FF<br>(-2048–2047 ) |
| 1 | 1 | 0 | $\pm 5.6$ Ga | 330 | 3.03 | 0xF800–0x07FF<br>(-2048–2047 ) |
| 1 | 1 | 1 | $\pm 8.1$ Ga | 230 | 4.35 | 0xF800–0x07FF<br>(-2048–2047 ) |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

- Mode Register: Es un registro donde los datos pueden ser leídos o escritos. En este registro se puede seleccionar el modo de operación del dispositivo<sup>87</sup>. En la tabla 25 se muestra la ubicación de los bits y el valor por defecto de cada uno, y en la tabla 26 se muestra la descripción de cada bit.

Tabla 25. Mode Register.

| MR7    | MR6 | MR5 | MR4 | MR3 | MR2 | MR1     | MR0     |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|---------|---------|
| HS (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | MD1 (0) | MD0 (1) |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

Tabla 26. Descripción de los bits.

| LOCALIZACION | NOMBRE    | DESCRIPCION                                        |
|--------------|-----------|----------------------------------------------------|
| MR7 a MR2    | HS        | Bit para habilitar la alta velocidad I2C, 3400kHz. |
| MR1 a MR0    | MD1 a MD0 | Bits para seleccionar el modo de operación.        |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

---

<sup>87</sup> Ibid., p. 14.

La tabla 27 muestra los modos de operación seleccionables como lo son la medición continua, única o modo inactivo.

Tabla 27. Modos de operación.

| MD1 | MD0 | MODO DE OPERACION                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0   | 0   | Modo de medición continua. El dispositivo realiza continuamente mediciones y ubica el resultado en los registros de datos. El bit RDY es alto (1) cuando los datos nuevos se ubican en los registros.                                                                        |
| 0   | 1   | Modo de medición única. El dispositivo realiza una única medición, el bit RDY queda en alto y el dispositivo pasa a modo inactivo. Los datos permanece en los registros de salida y el bit RDY permanece en alto hasta que se leen los registros o se realiza otra medición. |
| 1   | 0   | Modo inactivo.                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 1   | 1   | Modo inactivo.                                                                                                                                                                                                                                                               |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

- Data Output X Registers A and B: Son dos registros de 8 bits donde se almacena el resultado de la medición del canal X. El registro A contiene el bit más significativo (MSB) y el registro B contiene el bit menos significativo (LSB)<sup>88</sup>. En la tabla 28 se muestra la ubicación de los bits y el valor por defecto de cada uno.

---

<sup>88</sup> Ibid., p. 15.

Tabla 28. Ubicación y valor de los bits.

| <b>DXRA7</b> | <b>DXRA6</b> | <b>DXRA5</b> | <b>DXRA4</b> | <b>DXRA3</b> | <b>DXRA2</b> | <b>DXRA1</b> | <b>DXRA0</b> |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          |
| <b>DXRB7</b> | <b>DXRB6</b> | <b>DXRB5</b> | <b>DXRB4</b> | <b>DXRB3</b> | <b>DXRB2</b> | <b>DXRB1</b> | <b>DXRB0</b> |
| (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

- Data Output Y Registers A and B: Son dos registros de 8 bits donde se almacena el resultado de la medición del canal Y. El registro A contiene el bit más significativo (MSB) y el registro B contiene el bit menos significativo (LSB)<sup>89</sup>. En la tabla 29 se muestra la ubicación de los bits y el valor por defecto de cada uno.

Tabla 29. Ubicación y valor de bits.

| <b>DYRA7</b> | <b>DYRA6</b> | <b>DYRA5</b> | <b>DYRA4</b> | <b>DYRA3</b> | <b>DYRA2</b> | <b>DYRA1</b> | <b>DYRA0</b> |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          |
| <b>DYRB7</b> | <b>DYRB6</b> | <b>DYRB5</b> | <b>DYRB4</b> | <b>DYRB3</b> | <b>DYRB2</b> | <b>DYRB1</b> | <b>DYRB0</b> |
| (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

- Data Output Z Registers A and B: Son dos registros de 8 bits donde se almacena el resultado de la medición del canal Z. El registro A contiene el bit más significativo (MSB) y el registro B contiene el bit menos

---

<sup>89</sup> Ibid., p. 15.

significativo (LSB)<sup>90</sup>. En la tabla 30 se muestra la ubicación de los bits y el valor por defecto de cada uno.

Tabla 30. Ubicación y valor de bits.

| <b>DZRA7</b> | <b>DZRA6</b> | <b>DZRA5</b> | <b>DZRA4</b> | <b>DZRA3</b> | <b>DZRA2</b> | <b>DZRA1</b> | <b>DZRA0</b> |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          |
| <b>DZRB7</b> | <b>DZRB6</b> | <b>DZRB5</b> | <b>DZRB4</b> | <b>DZRB3</b> | <b>DZRB2</b> | <b>DZRB1</b> | <b>DZRB0</b> |
| (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          | (0)          |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

- Status Register: Es un registro de sólo lectura usado para indicar el estado del dispositivo<sup>91</sup>. En la tabla 31 se muestra la ubicación de los bits y el valor por defecto de cada uno, y en la tabla 32 se muestra la descripción de cada bit.

Tabla 31. Status Register.

| <b>SR7</b> | <b>SR6</b> | <b>SR5</b> | <b>SR4</b> | <b>SR3</b> | <b>SR2</b> | <b>SR1</b> | <b>SR0</b> |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| (0)        | (0)        | (0)        | (0)        | (0)        | (0)        | LOCK (0)   | RDY (1)    |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

---

<sup>90</sup> Ibid., p. 15.

<sup>91</sup> Ibid., p. 16.

Tabla 32. Descripción de los bits.

| LOCALIZACION | NOMBRE | DESCRIPCION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SR7 a SR2    | 0      | Bits reservados.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| SR1          | LOCK   | <p>Bloqueo de registros de salida de datos. Este bit se pone en alto cuando:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Algunos pero no todos los seis registros de salida de datos han sido leídos,</li> <li>2. El registro de modo de operación (Mode Register) ha sido leído.</li> </ol> <p>Cuando este bit se pone en alto, los seis registros de salida de datos son bloqueados y cualquier dato nuevo no se ubicara en los registros hasta que:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Todos los seis registros hayan sido leídos,</li> <li>2. El registro de modo de operación es cambiado,</li> <li>3. La configuración de medición (CRA) es cambiada,</li> <li>4. Se reinicia la alimentación.</li> </ol> |
| SR0          | RDY    | <p>Bit “listo”. Se pone en alto cuando los datos se escriben en todos los registros de salida. Se pone en nivel bajo cuando el dispositivo inicia una escritura a los registros de salida de datos y después de que uno o más registros se escriben. El pin DRDY puede ser usado como una alternativa al registro de estado (Status Register) para el monitoreo de los datos medidos.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

- Identification Register A: Es un registro de sólo lectura usado para identificar el dispositivo<sup>92</sup>. En la tabla 33 se muestra la ubicación de los bits y el valor por defecto de cada uno.

---

<sup>92</sup>Ibid., p. 17.

Tabla 33. Identification Register A.

| IRA7 | IRA6 | IRA5 | IRA4 | IRA3 | IRA2 | IRA1 | IRA0 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0    | 1    | 0    | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

- Identification Register B: Es un registro de sólo lectura usado para identificar el dispositivo<sup>93</sup>. En la tabla 34 se muestra la ubicación de los bits y el valor por defecto de cada uno.

Tabla 34. Identification Register B.

| IRB7 | IRB6 | IRB5 | IRB4 | IRB3 | IRB2 | IRB1 | IRB0 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0    | 0    | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 0    |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

- Identification Register C: Es un registro de sólo lectura usado para identificar el dispositivo<sup>94</sup>. En la tabla 35 se muestra la ubicación de los bits y el valor por defecto de cada uno.

Tabla 35. Identification Register C.

| IRC7 | IRC6 | IRC5 | IRC4 | IRC3 | IRC2 | IRC1 | IRC0 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0    | 0    | 1    | 1    | 0    | 0    | 1    | 1    |

Fuente: HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.

---

<sup>93</sup> Ibid., p. 17.

<sup>94</sup> Ibid., p. 17.

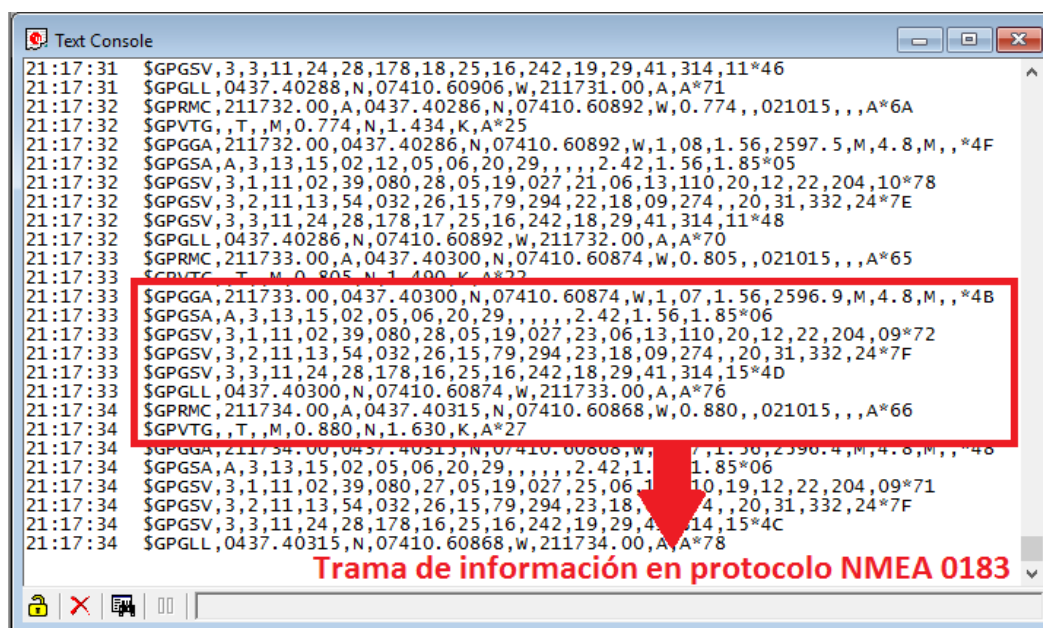
## 4.2.4 Configuración de sensores

Algunos sensores deben ser configurados para que se ajusten a las necesidades que demanda el proyecto, entre estos se encuentran el módulo receptor GPS y la brújula magnética.

### 4.2.4.1 Configuración del módulo GPS

El módulo GPS seleccionado cuenta con una configuración por defecto de su puerto serial donde la velocidad de transmisión es de 9600 baudios, a 8 bits, sin bit de paridad y con un 1 bit de parada<sup>95</sup>. Las sentencias de protocolo NMEA enviadas por el módulo son las que se ven en la figura 96 mediante el software de configuración u-center de la empresa u-blox.

Figura 96. Sentencias del protocolo NMEA.



```
21:17:31 $GPGSV,3,3,11,24,28,178,18,25,16,242,19,29,41,314,11*46
21:17:31 $GPGLL,0437.40288,N,07410.60906,W,211731.00,A,A*71
21:17:32 $GPRMC,211732.00,A,0437.40286,N,07410.60892,W,0.774,,021015,,,A*6A
21:17:32 $GPVTG,,T,,M,0.774,N,1.434,K,A*25
21:17:32 $GPGGA,211732.00,0437.40286,N,07410.60892,W,1,08,1.56,2597.5,M,4.8,M,,*4F
21:17:32 $GPGSA,A,3,13,15,02,12,05,06,20,29,,,,,2.42,1.56,1.85*05
21:17:32 $GPGSV,3,1,11,02,39,080,28,05,19,027,21,06,13,110,20,12,22,204,10*78
21:17:32 $GPGSV,3,2,11,13,54,032,26,15,79,294,22,18,09,274,,20,31,332,24*7E
21:17:32 $GPGSV,3,3,11,24,28,178,17,25,16,242,18,29,41,314,11*48
21:17:32 $GPGLL,0437.40286,N,07410.60892,W,211732.00,A,A*70
21:17:33 $GPRMC,211733.00,A,0437.40300,N,07410.60874,W,0.805,,021015,,,A*65
21:17:33 $GPVTG,,T,,M,0.805,N,1.490,K,A*22
21:17:33 $GPGGA,211733.00,0437.40300,N,07410.60874,W,1,07,1.56,2596.9,M,4.8,M,,*4B
21:17:33 $GPGSA,A,3,13,15,02,05,06,20,29,,,,,2.42,1.56,1.85*06
21:17:33 $GPGSV,3,1,11,02,39,080,28,05,19,027,23,06,13,110,20,12,22,204,09*72
21:17:33 $GPGSV,3,2,11,13,54,032,26,15,79,294,23,18,09,274,,20,31,332,24*7F
21:17:33 $GPGSV,3,3,11,24,28,178,16,25,16,242,18,29,41,314,15*4D
21:17:33 $GPGLL,0437.40300,N,07410.60874,W,211733.00,A,A*76
21:17:34 $GPRMC,211734.00,A,0437.40315,N,07410.60868,W,0.880,,021015,,,A*66
21:17:34 $GPVTG,,T,,M,0.880,N,1.630,K,A*27
21:17:34 $GPGGA,211734.00,0437.40315,N,07410.60868,W,1,07,1.56,2596.4,M,4.8,M,,*4B
21:17:34 $GPGSA,A,3,13,15,02,05,06,20,29,,,,,2.42,1.56,1.85*06
21:17:34 $GPGSV,3,1,11,02,39,080,27,05,19,027,25,06,13,110,19,12,22,204,09*71
21:17:34 $GPGSV,3,2,11,13,54,032,26,15,79,294,23,18,09,274,,20,31,332,24*7F
21:17:34 $GPGSV,3,3,11,24,28,178,16,25,16,242,19,29,41,314,15*4C
21:17:34 $GPGLL,0437.40315,N,07410.60868,W,211734.00,A,A*78
```

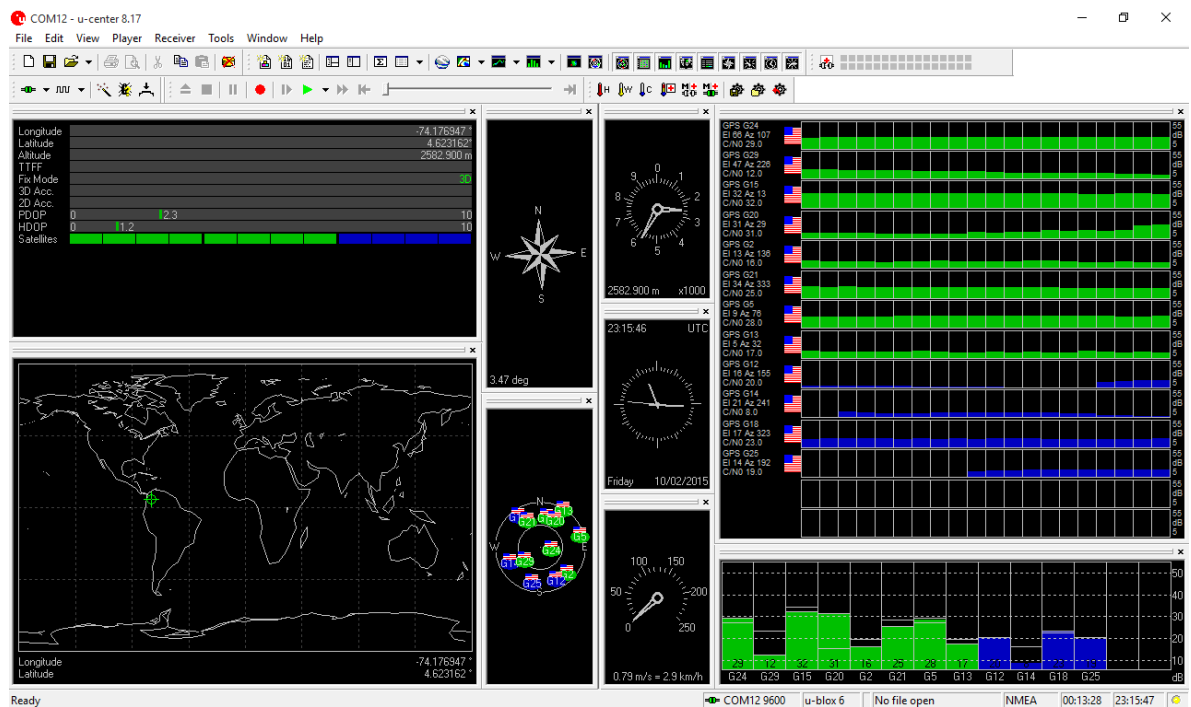
Trama de información en protocolo NMEA 0183

Fuente: Propia del autor.

<sup>95</sup> u-blox. NEO-6, u-blox 6 GPS Modules Data Sheet. [en línea]. 2011. [consultado 2 de Octubre de 2015]. p. 1-25. Disponible en: <[https://www.openimpulse.com/blog/wp-content/uploads/wpsc/downloadables/GY-NEO6MV2-GPS-Module-Datasheet.pdf](https://www.openimpulse.com/blog/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wpsc/downloadables/GY-NEO6MV2-GPS-Module-Datasheet.pdf)>

El programa u-center (figura 97) es una poderosa plataforma de evaluación, configuración y visualización en tiempo real de productos GNSS desarrollados por u-blox (módulos receptores GPS). Ofrece beneficios con su uso fácil e interactivo, acceso a todos los controles y los mensajes de salida, soporte de todos los módulos receptores GPS u-blox, entre otros. Además incorpora funciones para exportar los datos a Google Earth y Google Maps, reconocer protocolo NMEA y UBX binario de u-blox y visualizar datos gráficamente en tiempo real (brújula, reloj, altímetro, velocímetro, vista de información del GPS y de los satélites)<sup>96</sup>. U-center puede ser descargado gratis y no es necesario adquirir una licencia para usar todas las herramientas que ofrece.

Figura 97. Interfaz del software u-center.



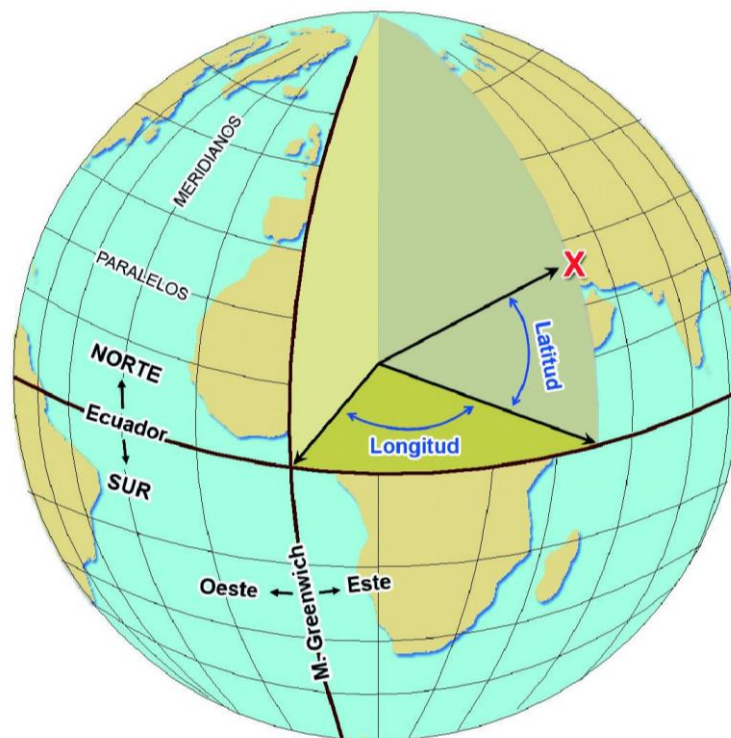
Fuente: Propia del autor.

<sup>96</sup> u-blox. u-center GPS evaluation software for PCs. [en línea]. 2009. [consultado 2 de Octubre de 2015]. p. 1. Disponible en: <[http://www.amtechs.co.jp/2\\_gps/pdf/u-center.pdf](http://www.amtechs.co.jp/2_gps/pdf/u-center.pdf)>



Es necesario configurar de nuevo el módulo GPS ya que la trama de datos que transmite es muy grande y sólo se necesita la información de la latitud y longitud, que son los valores de las coordenadas geográficas y de esta forma poder saber la posición del robot en el planeta. Un ejemplo sobre las coordenadas geográficas se aprecia en la figura 98. Según el protocolo NMEA 0183, las sentencias que transmiten información de las coordenadas que se necesitan son la GGA, GLL y RMC.

Figura 98. Ejemplo de coordenadas geográficas.

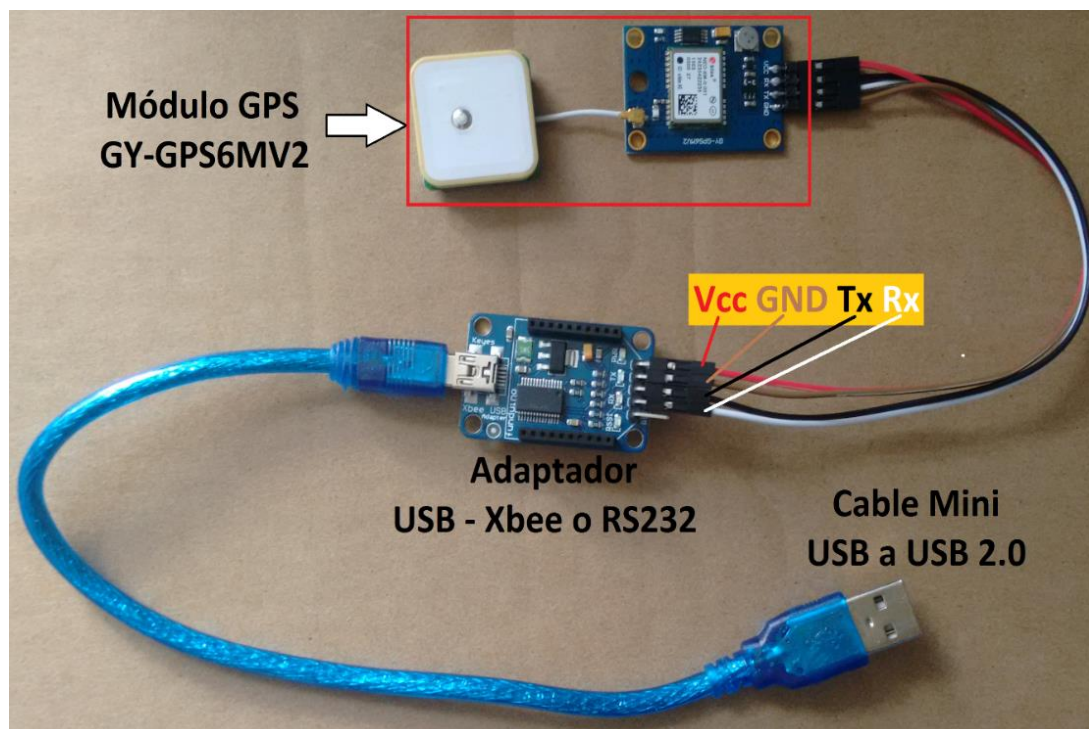


Fuente: LA VERDAD MULTIMEDIA. La cartografía actual: topográfica, ortofotos e imágenes de satélite

Ya que los datos necesarios se encuentran en tres sentencias (GGA, GLL y RMC), se decidió configurar el módulo GPS para que transmita la sentencia GLL porque es la que tiene menor tamaño (cincuenta caracteres tipo ASCII). A continuación se presentan los pasos para la configuración del módulo GPS.

- En primer lugar, se deben tener las herramientas que permitan la configuración del módulo seleccionado. Entre estas se encuentra el software de configuración u-center que se puede descargar sin costo desde la página web de u-blox, un módulo adaptador o tarjeta electrónica USB a serial (RS232) que se consigue en el mercado nacional, y el módulo GPS a configurar, así como se aprecia en la figura 99.

Figura 99. Tarjeta USB a Serial y Modulo GPS.

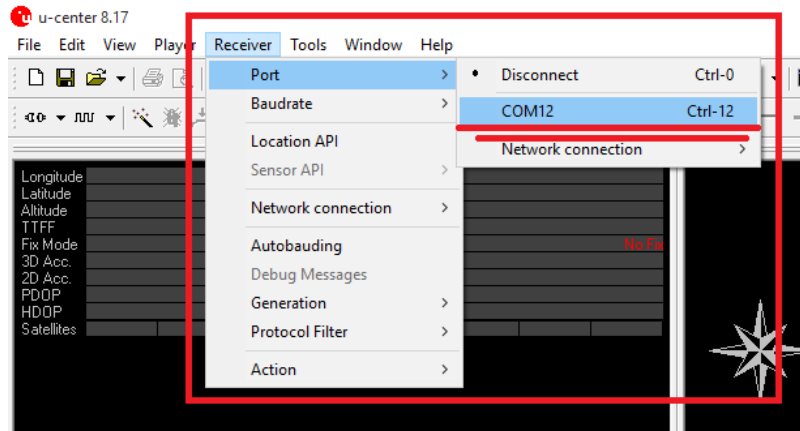


Fuente: Propia del autor.

- Seguido, se procede a conectar el cable USB al computador y se inicia el programa u-center. Lo primero que se debe hacer después de que el programa inicie es seleccionar el puerto y la velocidad de transmisión que por defecto es de 9600 baudios. Se debe seguir la siguiente ruta para seleccionar el puerto de comunicación, *Receiver -> Port -> COMXX*. En el caso de la figura 100 el COM es el número 12. Por otro lado, para seleccionar la velocidad de transmisión se debe seguir la ruta *Receiver -> Baudrate -> 9'600* como se ve en la figura 101. En la figura 102 se

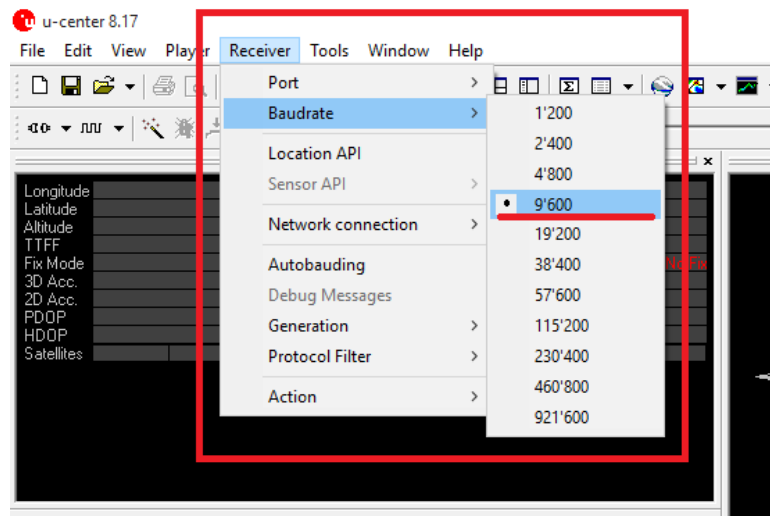
muestra un indicador de conexión que está en la parte inferior derecha de la ventana principal. Otras opciones para seleccionar el puerto y la velocidad de transmisión son las herramientas *Connect* y *Baudrate* de la barra de herramientas *Receiver Toolbar* que se ven en la figura 103.

Figura 100. Selección del COM.



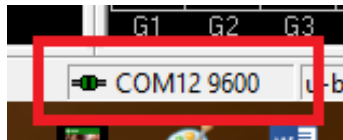
Fuente: Propia del autor.

Figura 101. Configuración de la velocidad de transmisión.



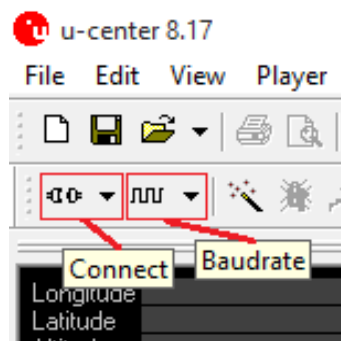
Fuente: Propia del autor.

Figura 102. Indicador de conexión.



Fuente: Propia del autor.

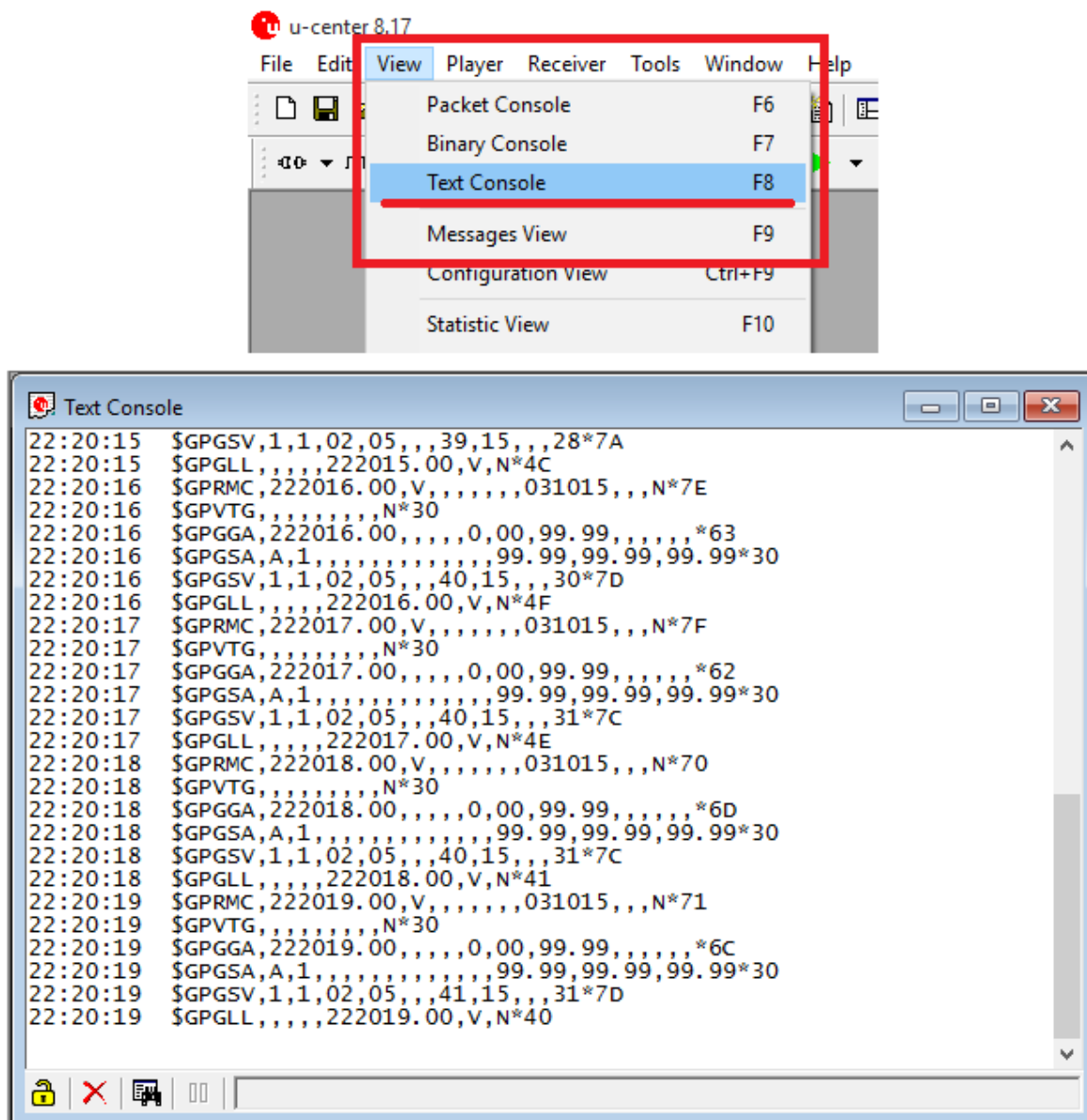
Figura 103. Opción para configuración del Baudrate y puerto de comunicación.



Fuente: Propia del autor.

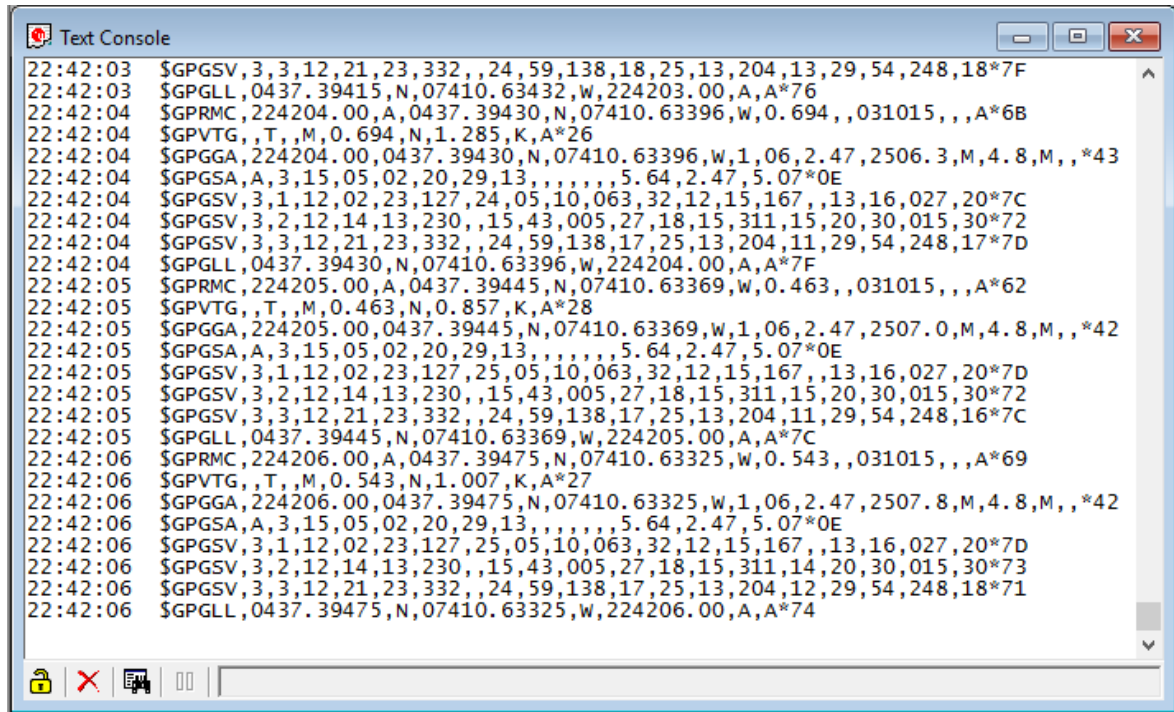
- Cuando ya se establece la conexión entre el módulo GPS y u-center, se pueden ver las sentencias que transmite en la ventana *Text Console* que se encuentra en la ruta *View -> Text Console* u oprimiendo la tecla F8 como se aprecia en la figura 104. Como se acaba de energizar el módulo GPS, la información mostrada no es completa porque aún no se ha enlazado con los satélites. Luego del enlace se transmite la información organizada en las sentencias configuradas por defecto como se ve en la figura 105.

Figura 104. Ruta de acceso a la ventana Text Console y ejemplo.



Fuente: Propia del autor.

Figura 105. Sentencias en protocolo NMEA 0183 transmitidas por el módulo.



```

22:42:03 $GPGSV,3,3,12,21,23,332,,24,59,138,18,25,13,204,13,29,54,248,18*7F
22:42:03 $GPGLL,0437.39415,N,07410.63432,W,224203.00,A,A*76
22:42:04 $GPRMC,224204.00,A,0437.39430,N,07410.63396,W,0.694,,031015,,A*6B
22:42:04 $GPVTG,,T,,M,0.694,N,1.285,K,A*26
22:42:04 $GPGGA,224204.00,0437.39430,N,07410.63396,W,1,06,2.47,2506.3,M,4.8,M,,*43
22:42:04 $GPGSA,A,3,15,05,02,20,29,13,,,,,5.64,2.47,5.07*0E
22:42:04 $GPGSV,3,1,12,02,23,127,24,05,10,063,32,12,15,167,,13,16,027,20*7C
22:42:04 $GPGSV,3,2,12,14,13,230,,15,43,005,27,18,15,311,15,20,30,015,30*72
22:42:04 $GPGSV,3,3,12,21,23,332,,24,59,138,17,25,13,204,11,29,54,248,17*7D
22:42:04 $GPGLL,0437.39430,N,07410.63396,W,224204.00,A,A*7F
22:42:05 $GPRMC,224205.00,A,0437.39445,N,07410.63369,W,0.463,,031015,,A*62
22:42:05 $GPVTG,,T,,M,0.463,N,0.857,K,A*28
22:42:05 $GPGGA,224205.00,0437.39445,N,07410.63369,W,1,06,2.47,2507.0,M,4.8,M,,*42
22:42:05 $GPGSA,A,3,15,05,02,20,29,13,,,,,5.64,2.47,5.07*0E
22:42:05 $GPGSV,3,1,12,02,23,127,25,05,10,063,32,12,15,167,,13,16,027,20*7D
22:42:05 $GPGSV,3,2,12,14,13,230,,15,43,005,27,18,15,311,15,20,30,015,30*72
22:42:05 $GPGSV,3,3,12,21,23,332,,24,59,138,17,25,13,204,11,29,54,248,16*7C
22:42:05 $GPGLL,0437.39445,N,07410.63369,W,224205.00,A,A*7C
22:42:06 $GPRMC,224206.00,A,0437.39475,N,07410.63325,W,0.543,,031015,,A*69
22:42:06 $GPVTG,,T,,M,0.543,N,1.007,K,A*27
22:42:06 $GPGGA,224206.00,0437.39475,N,07410.63325,W,1,06,2.47,2507.8,M,4.8,M,,*42
22:42:06 $GPGSA,A,3,15,05,02,20,29,13,,,,,5.64,2.47,5.07*0E
22:42:06 $GPGSV,3,1,12,02,23,127,25,05,10,063,32,12,15,167,,13,16,027,20*7D
22:42:06 $GPGSV,3,2,12,14,13,230,,15,43,005,27,18,15,311,14,20,30,015,30*73
22:42:06 $GPGSV,3,3,12,21,23,332,,24,59,138,17,25,13,204,12,29,54,248,18*71
22:42:06 $GPGLL,0437.39475,N,07410.63325,W,224206.00,A,A*74

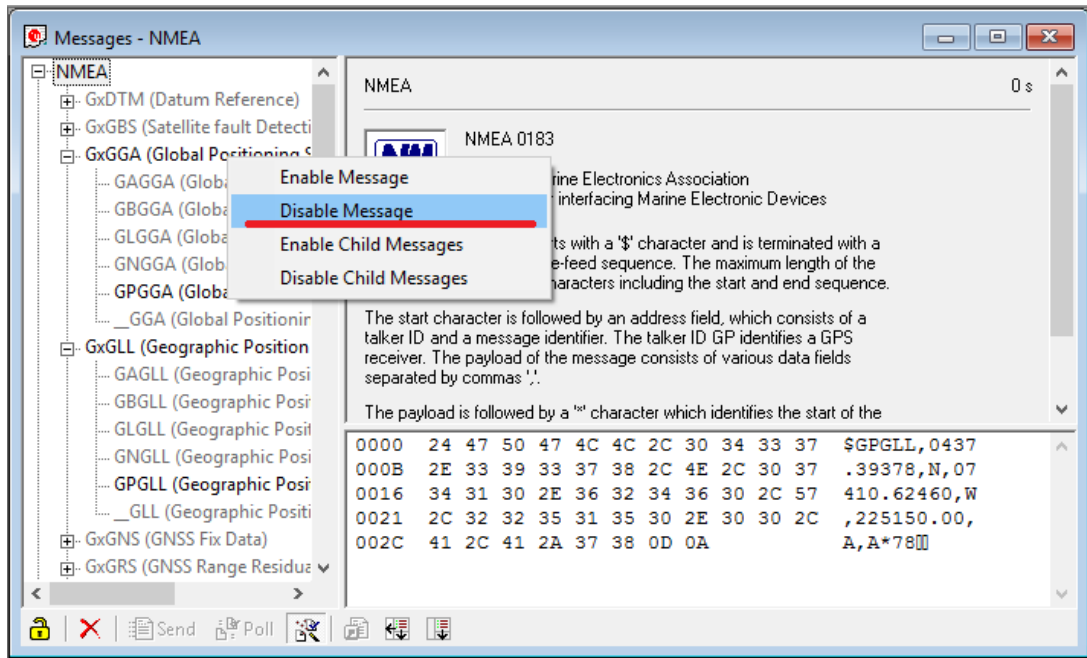
```

Fuente: Propia del autor.

- Como sólo se necesita la transmisión de la sentencia GLL, se deben deshabilitar las otras sentencias. Para esto se abre la herramienta *Messages View* que está en la ruta *View -> Messages View*, y posterior se deshabilitan todas las sentencias dando click derecho sobre cada una y luego click izquierdo sobre *Disable Message* como se ve en el ejemplo de la figura 106. En la figura 107 se evidencia el cambio en la trama de datos transmitidos por el módulo, donde ahora la única sentencia que se puede ver en la ventana *Text Console* es la GLL.

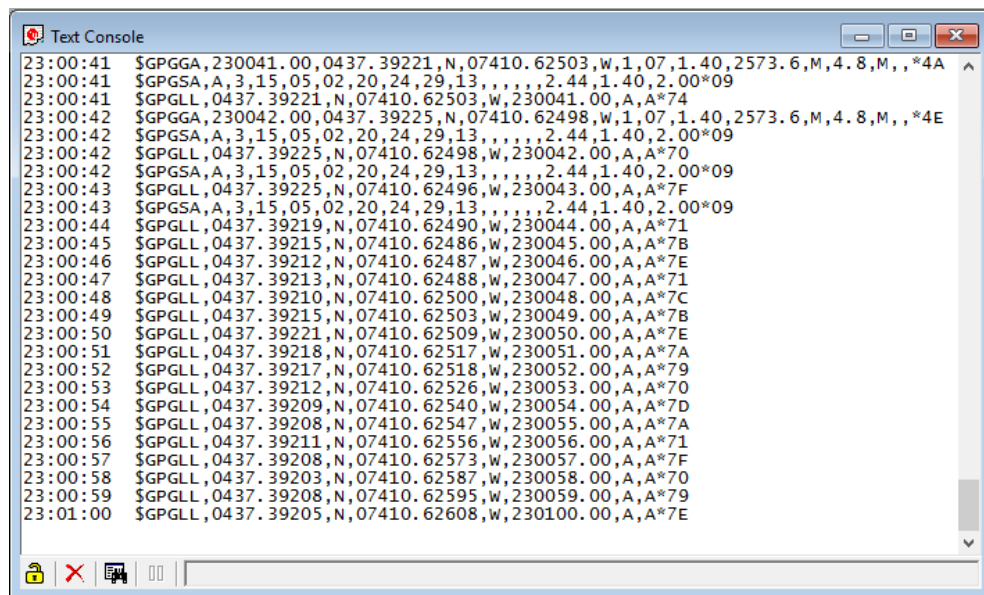


Figura 106. Deshabilitar sentencias.



Fuente: Propia del autor.

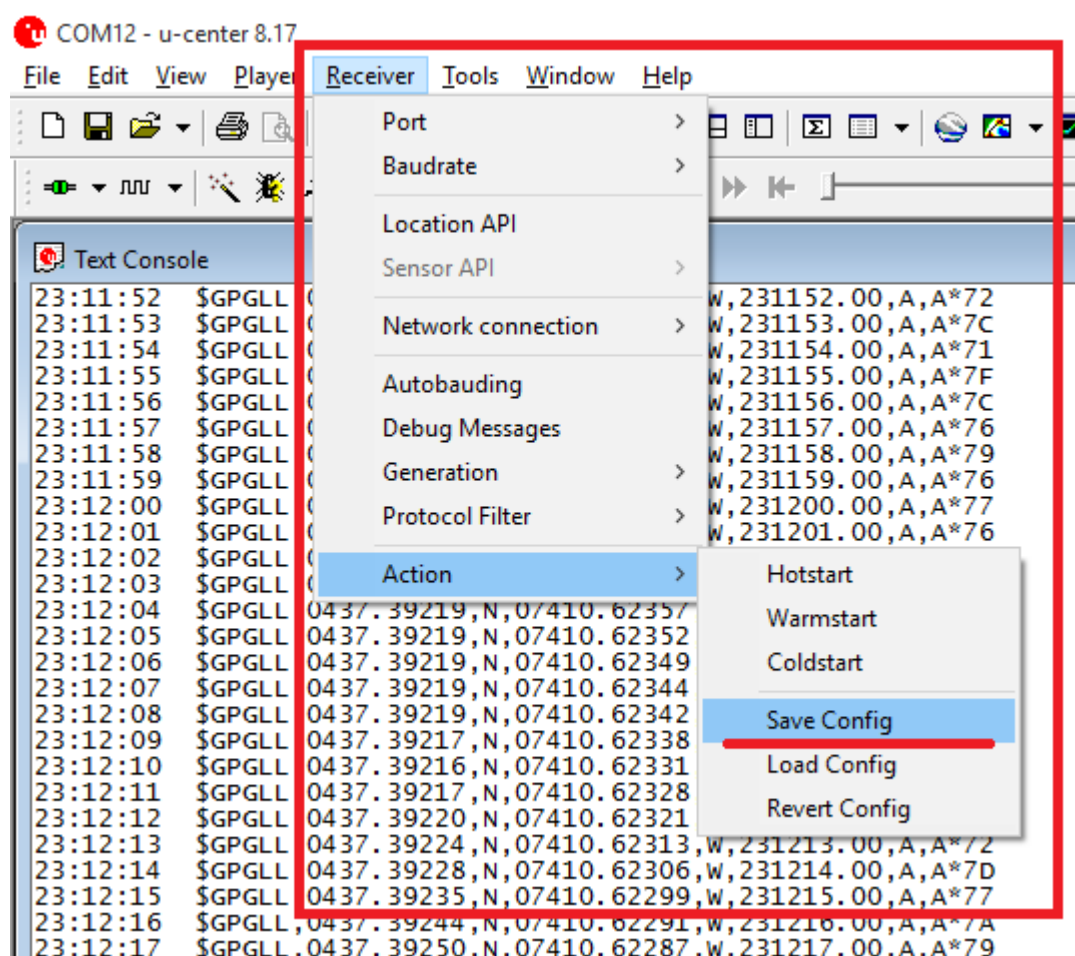
Figura 107. SentenciaGLL.



Fuente: Propia del autor.

- Por último, para asegurar que no se pierda la configuración luego de desconectar el módulo, se debe guardar usando la opción *Save Config* ubicada en la ruta *Receiver -> Action -> Save Config* como se ve en la figura 108. Para verificar que la configuración haya sido un éxito se desconecta el cable USB y se esperan cinco minutos para luego conectar de nuevo y validar la información que se muestra en la ventana *Text Console*.

Figura 108. Salvar la configuración en u-center.



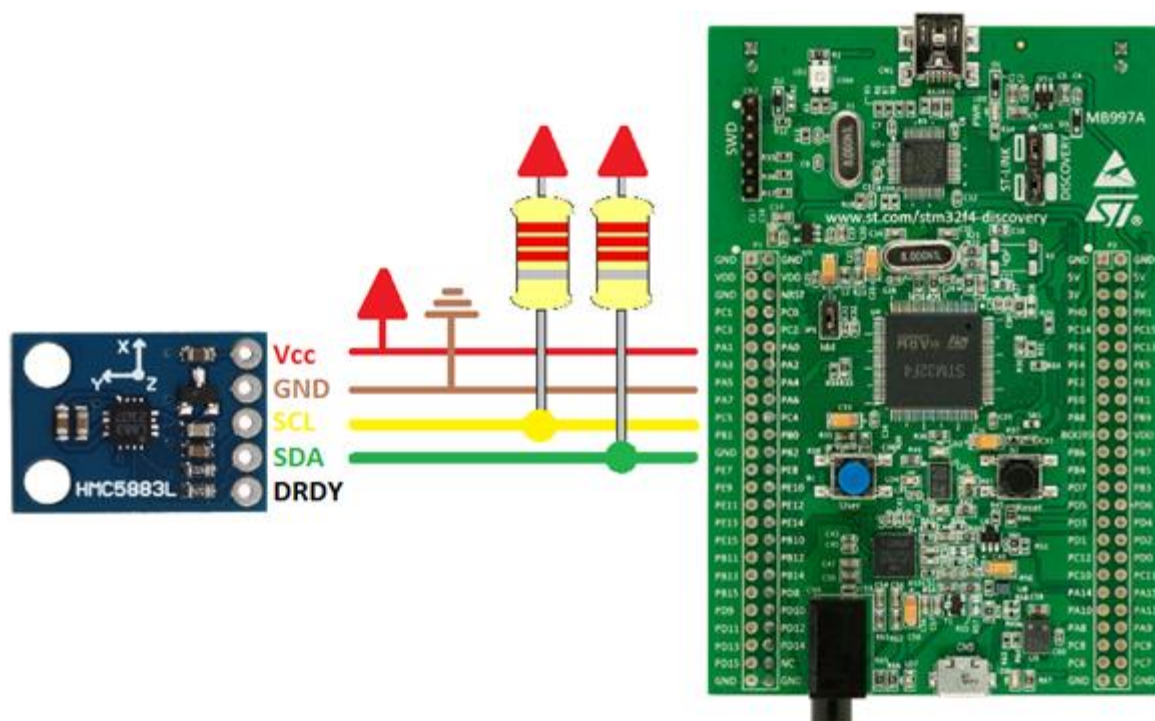
Fuente: Propia del autor.



#### 4.2.4.2 Configuración de la brújula magnética

Para integrar la brújula magnética a cada uno de los robots, primero se deben configurar algunos registros ya que la configuración que tiene por defecto no se ajusta a las necesidades que demanda el proyecto. Se necesita tener un dispositivo que actúe como maestro para configurar el sensor por medio de un enlace punto a punto que se forma con la interfaz I2C. Para un mejor entendimiento, la figura 109 muestra la conexión entre el sensor (dispositivo esclavo) y la tarjeta de desarrollo seleccionada (dispositivo maestro). Según el fabricante del HMC5883L, las resistencias que debe tener cada línea del bus I2C (SDA y SCL) son de 2.2K Ohm en configuración pull-up (uno de los extremos a Vcc).

Figura 109. Circuito entre sensor y tarjeta de desarrollo.



Fuente: Propia del autor.

Se debe configurar el sensor para que la frecuencia de medición sea de 0.75 Hz, tener un promedio de ocho muestras por medición y que la medición sea continua. Los registros que se deben configurar son el Configuration Register A

(CRA) y el Mode Register (MR). A continuación se presentan los pasos para configurar el sensor de forma que se pueda usar cualquier dispositivo como maestro.

- Si se escoge una tarjeta de desarrollo para que sea el dispositivo maestro, hay que asegurarse que cuente con una librería para comunicación I2C. En el caso de la STM32F4DISCOVERY, el compilador usado para programarla (mikroC PRO for ARM) cuenta con una gran variedad de librerías, donde dos de estas están enfocadas a la comunicación por I2C. Las librerías *I2C* y *Software I2C* son las herramientas de ayuda que ofrece el compilador. Luego de ver los códigos de ejemplo y la descripción de cada librería en la ayuda del compilador, se decidió usar la librería *Software I2C* por la libertad que ofrece al usuario de programar las rutinas de lectura y escritura.
- Para la configuración del sensor se usan solamente rutinas de escritura que se ejecuten una vez. En la figura 110 se ve el diagrama de flujo de la rutina de escritura que puede servir de guía para cualquier dispositivo maestro.
- Según la información sobre los registros encontrada en la hoja de datos del sensor HMC5883L, el dato de 8 bits que se debe escribir en el registro CRA es 01100000 (0x60), y el registro quedaría configurado como se aprecia en la tabla 36. Por otra parte, el dato a escribir en el registro MR es 00000000 (0x00), y el registro queda configurado como se ve en la tabla 37.

Tabla 36. Configuración establecida para el registro Configuration Register A.

| CRA7 | CRA6 | CRA5 | CRA4 | CRA3 | CRA2 | CRA1 | CRA0 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0    | 1    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

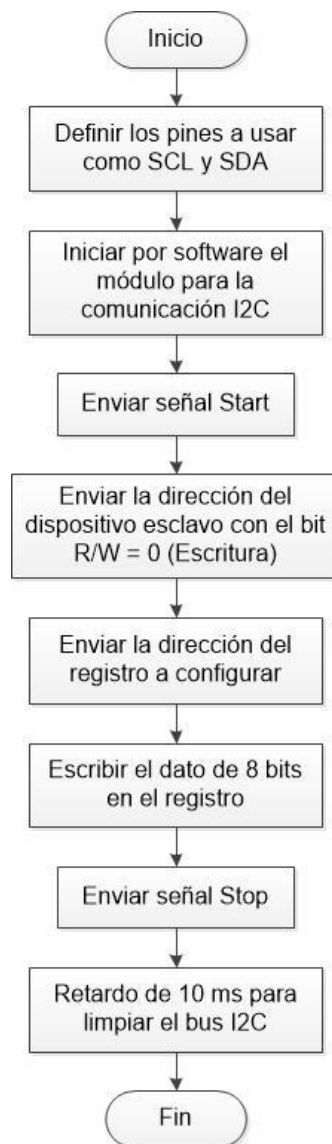
Fuente: Propia del autor.

Tabla 37. Configuración establecida para el registro Mode Register.

| MR7 | MR6 | MR5 | MR4 | MR3 | MR2 | MR1 | MR0 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

Fuente: Propia del autor.

Figura 110. Diagrama de flujo general para la configuración del sensor GY-273.



Fuente: Propia del autor.

El código de configuración se agrega al código principal del proyecto para asegurarse de que la brújula siempre inicie configurada como se necesita.

### 4.3 MODULO DE COMUNICACION INALAMBRICO

En robótica son popularmente usados los módulos de comunicación inalámbricos que permiten la interacción a través de la transmisión y recepción de datos de tarjetas de desarrollo o microcontroladores. Entre las tecnologías usadas para la comunicación inalámbrica en robótica se encuentra el Bluetooth, RF (Radio Frecuencia), Wi-Fi y ZigBee, todas compatibles con la interfaz serial RS-232. En la tabla 38 se reúnen algunas características de las cuatro tecnologías tenidas en cuenta para la selección del módulo de comunicación a implementar en el proyecto.

Tabla 38. Protocolos de comunicación inalámbrica.

| Bluetooth                                                                                                                      | RF                                                                          | Wi-Fi                                                                                               | ZigBee                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Trabaja en dos niveles de potencia:<br>Potencia menor (1mW) que cubre 10 metros<br>Potencia mayor (100mW) que cubre 100 metros | Funciona dentro del rango de 30 a 3000 MHz                                  | Basada en el estándar IEEE 802.11 con tecnologías certificadas 802.11b y 802.11g, ambas compatibles | Basada en el estándar IEEE 802.15.4 de WPAN                                          |
| Seguridad de red con un nivel básico de encriptación                                                                           | Dependiente de las características del dispositivo usado en la comunicación | Seguridad de red vulnerable                                                                         | Tecnología prevista a usarse en domótica por su topología de red y fácil integración |
| Capacidad máxima por canal de 720 Kbps                                                                                         | No tiene un protocolo establecido                                           | Velocidad de transmisión:<br>802.11b = 11Mbps<br>802.11g = 54Mbps                                   | Puede constar de un máximo de 65535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos      |

|                                                                                                                       |                                                                                                 |                                                                                                  |                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Funciona en la frecuencia de 2.45 GHz, con rangos que van desde los 2.4 a los 2.5 GHz                                 | La velocidad de transmisión no debe superar los 4800 baudios y la de recepción los 2400 baudios | Funciona en la frecuencia de 2.4 GHz                                                             | Funciona en la frecuencia de 2.405 a 2.480 GHz (16 canales), 902 a 928 MHz (10 canales) y 868 MHz (1 canal) |
| Basado en el modo de operación maestro – esclavo (punto a punto)                                                      | Tecnología versátil                                                                             | Información transmitida en tramas divididas en cabecera (gestión de datos) y datos (información) | Velocidades de transmisión de 20, 40 y 250 Kbps                                                             |
| Información transmitida en tramas divididas en código de acceso (72 bits), cabecera (54 bits) y datos (0 – 2744 bits) | Se necesita crear un protocolo que permita establecer una comunicación multipunto               | Se pueden usar dos topologías, Ad-Hoc (multipunto) e infraestructura (punto a multipunto)        | Permite múltiples topologías de red punto a punto y multipunto                                              |
| Los protocolos que gestionan la comunicación son el LMP, L2CAP, SDP, RFCOMM                                           | Usado en aplicaciones de espacio limitado                                                       | La potencia de la señal se ve afectada por los objetos presentes en el ambiente                  | Tiene bajo consumo de potencia gracias a los nodos esclavos                                                 |

Fuente: GARCÍA, Elisabeth. Análisis de Prestaciones de Sistemas de Comunicaciones Inalámbricas en Aplicaciones de Robótica: Sistema Software

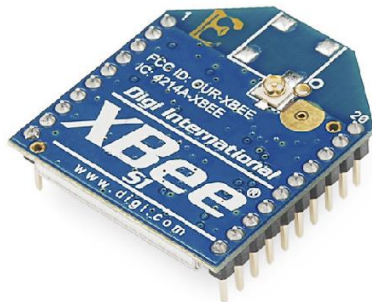
Teniendo como base la información de la tabla anterior y los requerimientos de comunicación en el proyecto, la tecnología que se decidió integrar fue la ZigBee. La tecnología ZigBee está presente en unos módulos de comunicación inalámbrica conocidos como XBee fabricados por la compañía Digi International.

Los módulos XBee (figura 111) utilizan el protocolo de red IEEE 802.15.4 para crear redes punto a multipunto y punto a punto. Pueden tener una antena tipo chip o cable, o conectores U.FL o RP-SMA para antenas de mayor dimensión. Se encuentran dos modelos, el XBee regular y el PRO. Las diferencias entre estos radican en el tamaño y en el alcance de la comunicación. El Xbee PRO es más largo, tiene un alcance de hasta 1.6 Km, pero tiene un mayor consumo de

potencia. Sin embargo, los dos modelos se pueden usar en una misma red. La mayoría de los módulos funcionan en la banda de 2.4 GHz, pero hay unos pocos que funcionan a 900 MHz, lo que implica un mayor alcance (hasta casi 24 Km) usando una antena de alta ganancia. Los módulos de 900 MHz no se pueden usar en algunos países, pero aun así, Digi International ofrece una versión de 868 MHz, aunque las dos versiones de operación no se pueden usar en una misma red<sup>97</sup>.

Figura 111. Módulos XBee.

**XBee serie 1 con conector U.FL**



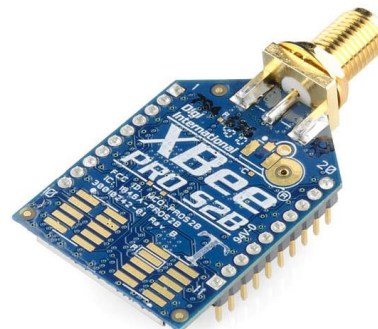
**XBee serie 2 con antena de cable**



**XBee PRO serie 1 con antena de chip**



**XBee PRO serie 2 con conector RP-SMA**



Fuente: Propia del autor.

---

<sup>97</sup>INGENIERÍA MCI LTDA. ¿QUÉ ES XBEE?. [en línea]. [consultado 22 de Septiembre de 2015]. Disponible en: <<http://xbec.cl/que-es-xbee/>>.

En la tabla 39 se presentan algunas especificaciones que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar el módulo de comunicación. Como el proyecto se presenta en una fase de prototipo, no es indispensable la integración de un módulo muy potente.

Tabla 39. Especificaciones de los módulos XBee.

| <b>Especificaciones</b>   | <b>XBee Serie 1</b>                                         | <b>XBee Serie 2</b>                                         | <b>XBee PRO Serie 1</b>                                     | <b>XBee PRO Serie 2</b>                                     |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Rango en interiores       | 30 m                                                        | 40 m                                                        | 90 m                                                        | 90 m                                                        |
| Rango en exteriores       | 100 m                                                       | 120 m                                                       | 1600 m                                                      | 3200 m                                                      |
| Potencia de transmisión   | 1 mW<br>(0 dbm)                                             | 2 mW<br>(+3 dbm)                                            | 63 mW<br>(+18 dbm)                                          | 63 mW<br>(+18 dbm)                                          |
| Velocidad de transmisión  | 250 Kbps                                                    | 250 Kbps                                                    | 250 Kbps                                                    | 250 Kbps                                                    |
| Sensibilidad del receptor | -92 dbm                                                     | -98 dbm                                                     | -100 dbm                                                    | -102 dbm                                                    |
| Frecuencia de operación   | ISM 2.4 GHz                                                 | ISM 2.4 GHz                                                 | ISM 2.4 GHz                                                 | ISM 2.4 GHz                                                 |
| Topologías de red         | Punto a punto, punto a multipunto, de igual a igual y malla | Punto a punto, punto a multipunto, de igual a igual y malla | Punto a punto, punto a multipunto, de igual a igual y malla | Punto a punto, punto a multipunto, de igual a igual y malla |

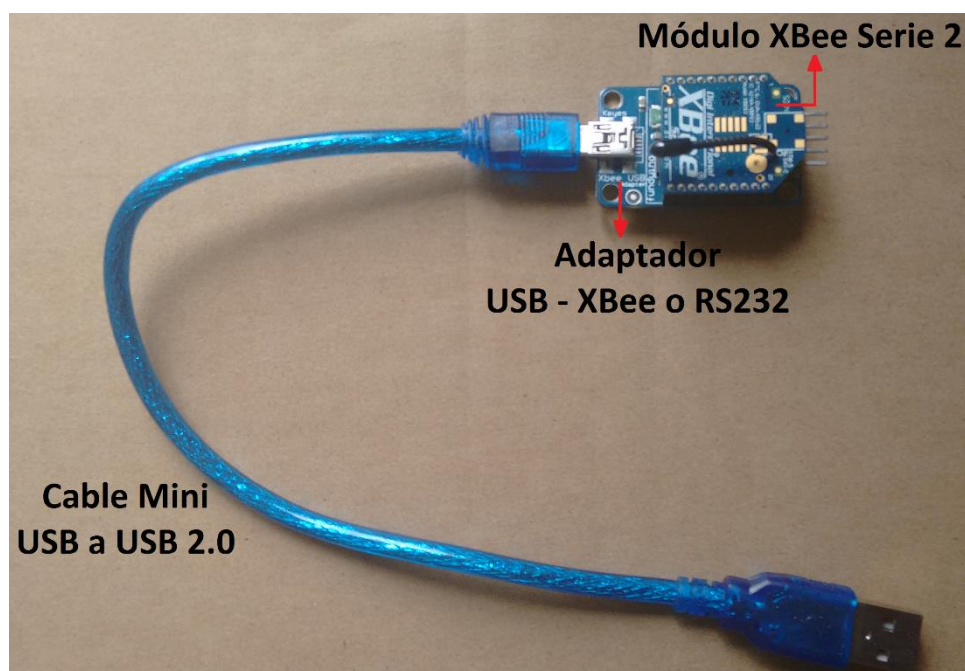
Fuente: Propia del autor.

Los módulos XBee Serie 2 y XBee PRO Serie 2 son las mejores opciones de los dos modelos disponibles en el mercado nacional, sin embargo, se decidió usar el XBee Serie 2 porque cumple con los requerimientos del proyecto y además tiene un costo menor que el modelo PRO.

### 4.3.1 Configuración módulo de comunicación

Una de las características importantes para el desarrollo del proyecto es que todos los robots sean capaces de comunicarse entre ellos, y por esto los módulos deben adoptar una topología de red que facilite la labor de comunicación. Ya que el módulo XBee seleccionado soporta diferentes topologías de red, es necesario configurar los módulos a usar para crear una red de comunicación en malla. Para configurar un XBee se necesita el software de configuración XCTU que se puede descargar gratuitamente desde la página web de Digi International, y una tarjeta electrónica USB a XBee que permita la conexión entre el computador y el modulo a configurar, como se ve en la figura 112.

Figura 112. Adaptador USB a XBee más el módulo Xbee y un cable mini USB.



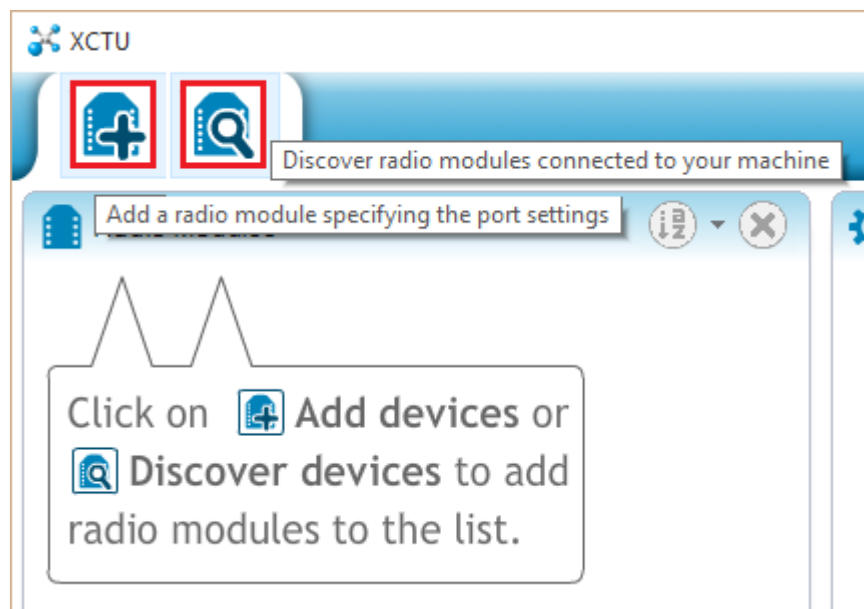
Fuente: Propia del autor.

A continuación se presentan los pasos para crear una red en malla con mínimo tres módulos XBee.



- Se conecta el cable USB al computador y posterior se inicia el programa XCTU. Antes de hacer alguna configuración se debe agregar el módulo XBee y para esto el usuario puede usar una de las dos herramientas ubicadas en la parte superior izquierda de la ventana principal (como se ve en la figura 113), nombradas como *Add devices* y *Discover devices*. Se pueden agregar el número de dispositivos que se puedan conectar al computador, o reconocer los dispositivos que estén enlazados con uno que se encuentre conectado.

Figura 113. Programa XCTU.



Fuente: Propia del autor.

La herramienta *Add devices* permite que el usuario seleccione el puerto y ajuste los parámetros, siendo el más importante el Baud Rate. En la figura 114 se presenta la ventana *Add radio device* donde se añade un módulo con Baud Rate por defecto de 9600 baudios.

Figura 114. Ventana Add radio device.

**Add radio device**

**Add a radio module**

Select and configure the Serial/USB port where the radio module is connected to.

☒ Select the Serial/USB port:

| COM12 | USB Serial Port |
|-------|-----------------|
|       |                 |

☐ Provide a port name manually:

Baud Rate: 9600

Data Bits: 7

Parity: None

Stop Bits: 1


Flow Control: None

☐ The radio module is programmable.

Fuente: Propia del autor.

Por otro lado, la herramienta *Discover devices* permite escanear los puertos seleccionados según los parámetros establecidos. Como se ve en la figura 115, el usuario selecciona los puertos y los parámetros para escanear en búsqueda de módulos XBee. Entre más parámetros se seleccionen mayor va a ser el tiempo que tarde en la búsqueda.

Figura 115. Herramienta Discover devices.

 Discover radio devices

—


□

×

### Select the ports to scan

Select the USB/Serial ports of your PC to be scanned when discovering for radio modules.

Select the ports to be scanned:

|                                     |                                                                                   |       |                 |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> |  | COM12 | USB Serial Port |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------|

Refresh ports

Select all


Deselect all

< Back

Next >

Finish

Cancel

 Discover radio devices

—

□

×

### Set port parameters

Configure the Serial/USB port parameters to discover radio modules.

Baud Rate:

☐ 1200

☒ 2400

☐ 4800

☒ 9600

☐ 19200

☐ 38400

Data Bits:

☐ 7

☒ 8

Parity:

☒ None

☐ Even

☐ Mark

☐ Odd

☐ Space

Stop Bits:

☒ 1

☐ 2

Flow Control:

☒ None

☐ Hardware

☐ Xon/Xoff

Select all

Deselect all

Set defaults

Estimated discovery time: 00:14

< Back

Next >

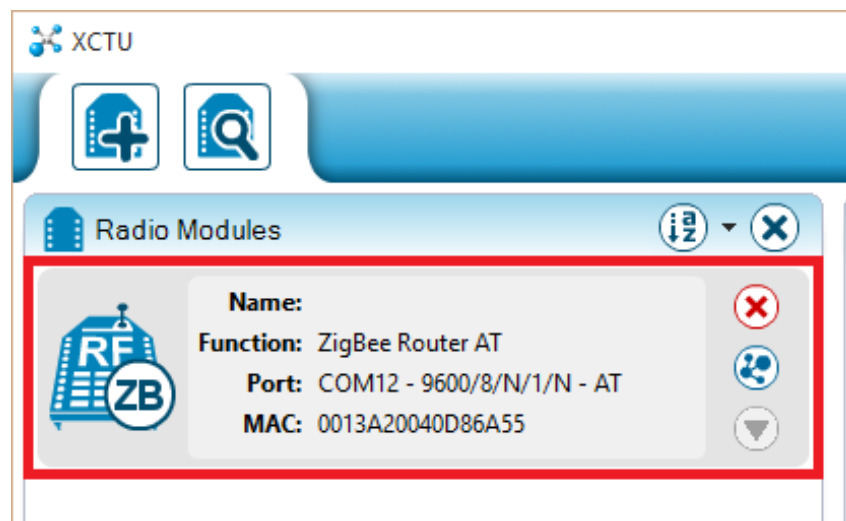
Finish

Cancel

Fuente: Propia del autor.

- Luego de agregar el módulo, en la parte izquierda de la ventana principal (*Radio Modules*) aparece el dispositivo agregado con los parámetros que tiene por defecto, así como se ve en la figura 116. Al dar click izquierdo se selecciona el módulo y cargan los parámetros en la parte derecha de la ventana principal (*Radio Configuration*) como se ve en la figura 117. En esta ventana se ajustan los parámetros para crear las diferentes topologías de red.

Figura 116. Ventana principal (Radio Modules).



Fuente: Propia del autor.

- Para crear una red en malla se deben configurar los módulos (en este caso son tres XBee) como router o dispositivo final. Lo primero que se hace es cambiar el firmware a ZNet 2.5 Router/End Device AT para los modelos XBee XB24-B. El modelo de cada módulo XBee aparece en la parte trasera como se ve en la figura 118. Los pasos para hacer el cambio de firmware se muestran en la figura 119 y figura 120.

Figura 117. Ventana principal (*Radio Configuration*).

The screenshot displays the 'Radio Configuration' window for a device with ID '- 0013A20040D86A55'. The interface includes a top toolbar with icons for tools, documents, chat, help, settings, terminal, and network. Below the toolbar, there are icons for refresh, edit, factory reset, download, and user profile, along with a search bar labeled 'Parameter' and expand/collapse buttons. The 'Firmware information' section lists: Product family: XB24-ZB, Function set: ZigBee Router AT, and Firmware version: 22A7. A legend on the right explains the status icons: green for 'Written and default', blue for 'Written and not default', green with a plus for 'Changed but not written', and red with a plus for 'Error in setting'. The 'Networking' section, titled 'Change networking settings', contains a list of parameters with their current values and status icons.

| Parameter                   | Value        | Unit/Type  | Status              |
|-----------------------------|--------------|------------|---------------------|
| ID PAN ID                   | 0            |            | Written and default |
| SC Scan Channels            | FFFF         | Bitfield   | Written and default |
| SD Scan Duration            | 3            | exponent   | Written and default |
| ZS ZigBee Stack Profile     | 0            |            | Written and default |
| NJ Node Join Time           | FF           | x 1 sec    | Written and default |
| NW Network Watchdog Timeout | 0            | x 1 minute | Written and default |
| JV Channel Verification     | Disabled [0] |            | Written and default |
| JN Join Notification        | Disabled [0] |            | Written and default |
| OP Operating PAN ID         | 234          |            | Written and default |
| OI Operating 16-bit PAN ID  | CC48         |            | Written and default |
| CH Operating Channel        | 15           |            | Written and default |

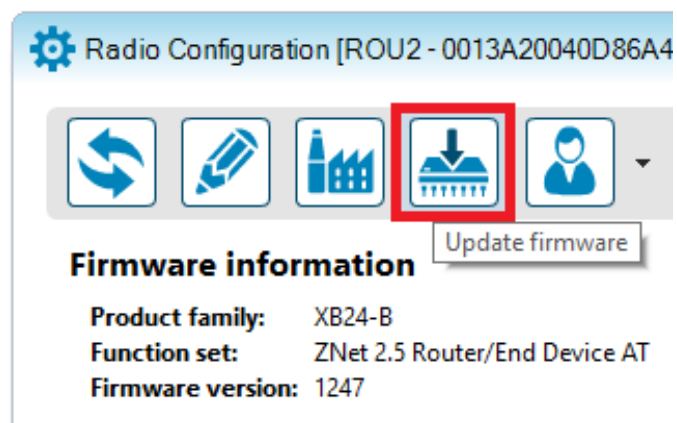
Fuente: Propia del autor.

Figura 118. Modelo del módulo XBee.



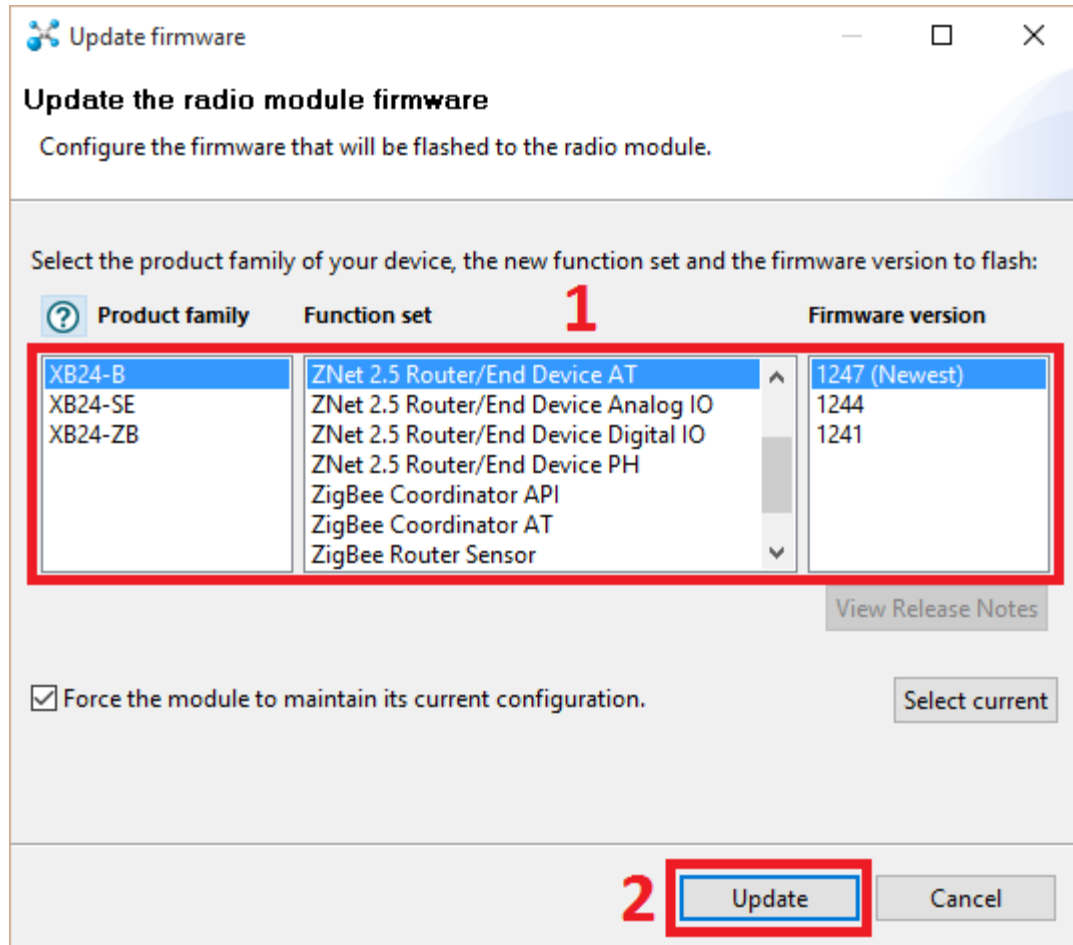
Fuente: Propia del autor.

Figura 119. Opción para seleccionar el firmware del módulo XBee.



Fuente: Propia del autor.

Figura 120. Pasos para cargar el firmware al módulo XBee.




Fuente: Propia del autor.

- Luego de que se cargue el firmware al módulo, se procede a configurar el parámetro PAN ID (identificación de red de área personal). Este parámetro debe ser igual para todos los XBee que conforman la red y puede ser cualquier valor hexadecimal que esté entre 0 y 0xFFFFFFFFFFFFFFFF. El valor del PAN ID se establece como 2222 y debe ser cargado al módulo dando click izquierdo sobre el icono *Write the setting to the radio module*. Además de ese parámetro, se deben ajustar el Destination Address High (DH) en 0 y el Destination Address Low (DL) en 0xFFFF, y luego cargar los ajustes como con el PAN ID. La figura 121 muestra las configuraciones de los parámetros cargados a los módulos.

Figura 121. Configuración de los parámetros del módulo XBee parte 1.

Radio Configuration [ROU1 - 0013A20040D86A55]

1 **ID PAN ID** 2222 3 

**SC** Scan Channels 1FFE Bit Write the setting to the radio module.

**SD** Scan Duration 3 exponent

**NJ** Node Join Time FF x 1 sec


**JV** Channel Verification Disabled [0]


▼ **Addressing**  
Change addressing settings

**MY** 16-bit Network Address 3B22

**SH** Serial Number High 13A200

**SL** Serial Number Low 40D86A55

2 **DH** Destination Address High 0 4 

**DL** Destination Address Low FFFF 

**ZA** ZigBee Addressing 0

**SE** Source Endpoint E8

**DE** Destination Endpoint E8

**CI** Cluster ID 11

Fuente: Propia del autor.

- Por último, se configuran los parámetros de Baud Rate (BD), Node Identifier (NI) y Device Type Identifier (DD). Para el Baud Rate se decide que los módulos trabajen a una tasa de baudios baja de 2400. Mientras que el NI puede tomar cualquier valor diferente, pero en este caso el NI de los tres módulos es ROU1, ROU2 y ROU3. El DD puede ser 0 para



todos. Estos parámetros deben ser cargados al igual que el PAN ID, DH y DL como se ve en la figura 122.

Figura 122. Configuración de los parámetros del módulo XBee parte 2.

The screenshot displays the 'Radio Configuration' window for a specific XBee module (ID: - 0013A20040D86A55). The interface includes a toolbar with icons for refresh, edit, factory reset, download, and user profile. A search bar labeled 'Parameter' is also present. The configuration is organized into several sections:

- General Parameters:**
  - NI Node Identifier:** Set to 'ROU1'. This field is highlighted with a red box and labeled with a red '1'. A red '4' is next to the edit icon.
  - BH Broadcast Radius:** Set to '0'. A tooltip says 'Write the setting to the radio module.'
  - AR Aggregation R...roadcast Time:** Set to 'FF' x 10 sec.
  - DD Device Type Identifier:** Set to '0'. This field is highlighted with a red box and labeled with a red '2'. A red '5' is next to the edit icon.
  - NT Node Discovery Backoff:** Set to '3C' x 100 ms.
  - NO Node Discovery Options:** Set to '0'.
- RF Interfacing:**
  - PL Power Level:** Set to 'Highest [4]'.
  - PM Power Mode:** Set to 'Boost Mode Enabled [1]'.
- Security:**
  - EE Encryption Enable:** Set to 'Disabled [0]'.
  - EO Encryption Options:** Set to '0' with 'Bitfield' selected.
  - KY AES Encryption Key:** An empty text field.
- Serial Interfacing:**
  - BD Baud Rate:** Set to '2400 [1]'. This field is highlighted with a red box and labeled with a red '3'. A red '6' is next to the edit icon.

Each parameter row includes a green refresh icon and a red edit icon. A red box highlights the edit icons for the NI Node Identifier, DD Device Type Identifier, and BD Baud Rate parameters.

Fuente: Propia del autor.

## **4.4 ACTUADORES**

En robótica, hay varios dispositivos usados como actuadores que transforman la energía hidráulica, neumática o eléctrica en fuerza o movimiento. Los actuadores más usados son los eléctricos debido a su versatilidad y fácil implementación. Los motores eléctricos de corriente directa hacen parte de los actuadores eléctricos y son integrados en el proyecto para solucionar las tareas de movimiento y giro.

### **4.4.1 Modulación por ancho de pulso**

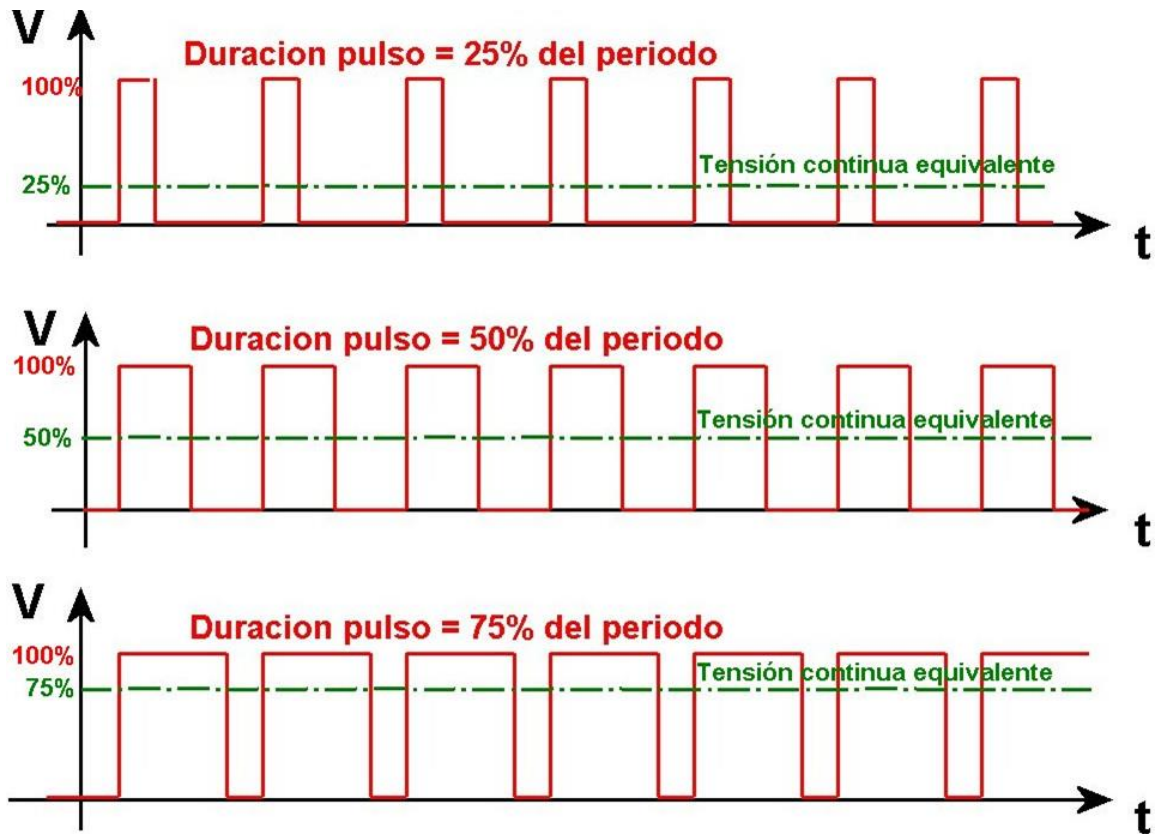
La modulación por ancho de pulso o PWM es un método de modificación de ciclo de trabajo de una señal, usada para controlar la energía que se suministra a un actuador eléctrico. Thomas Bräunl<sup>98</sup> afirma que en vez de generar una señal de salida analógica con tensión proporcional a la velocidad de un motor, es suficiente generar pulsos digitales a una frecuencia fija y en el nivel de tensión del sistema completo.

La variación del ciclo de trabajo o duty cycle, permite controlar la velocidad de un motor de corriente continua ya que se controla la cantidad de energía efectiva por ciclo, así como se presenta en el ejemplo de la figura 123. Los actuadores eléctricos que necesitan una señal de entrada PWM son los motores DC con escobillas (no siempre) y sin escobillas para controlar la velocidad, y los servomotores para controlar la posición.

---

<sup>98</sup> BRÄUNL. Op. cit., p. 46.

Figura 123. Ejemplo de señal PWM con ciclo de trabajo variado.



Fuente: HETPRO. BeagleBone Black: PWM.

La señal PWM puede ser generada por un microcontrolador que tenga un puerto de salida que soporte la modulación que es creada por software. Además, el puerto debe ser conectado a un amplificador de potencia ya que el microcontrolador está limitado para alimentar un motor directamente.

#### 4.4.2 Motor brushless

Un motor brushless (figura 124) o sin escobillas es un actuador que realiza la conmutación para la transferencia de energía de forma electrónica, es decir que es controlado por un circuito regulador de velocidad (ESC) y elimina algunos problemas que tienen los motores con escobillas, como por ejemplo el bajo rendimiento, el ruido y el desgaste de sus partes internas.

Figura 124. Motor Brushless.



Fuente: HOBBYKING. CF 28-05 Brushless Outrunner 1600Kv.

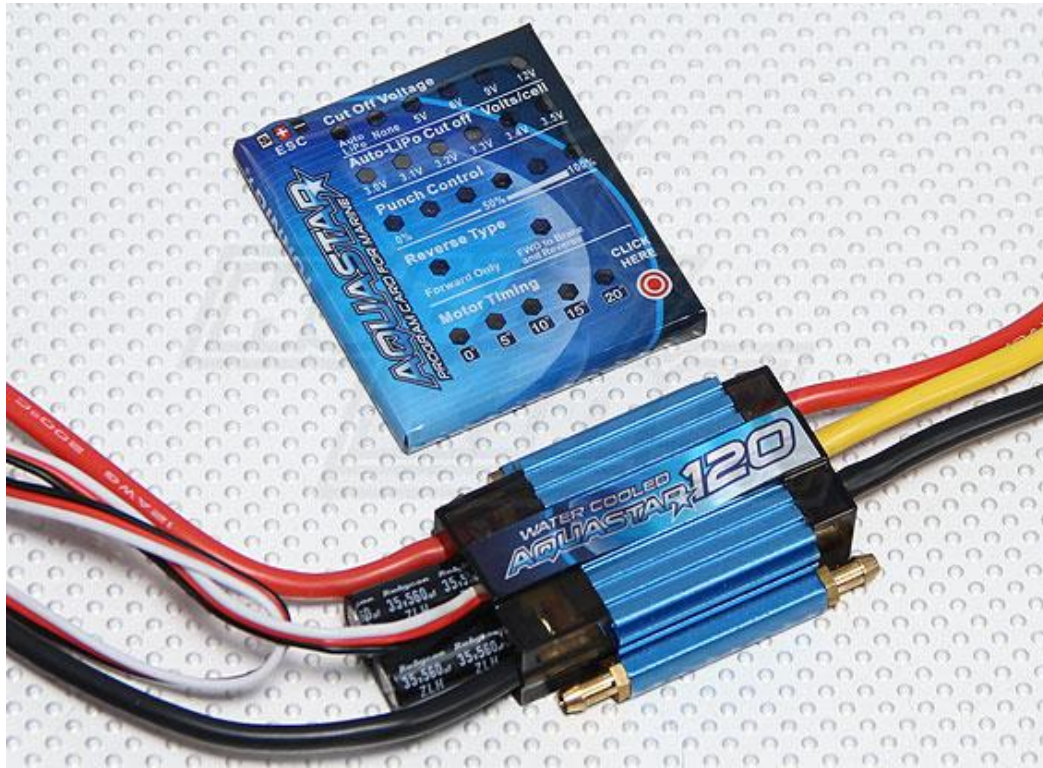
Como parámetro importante en el criterio de selección de un motor brushless se tiene el factor kv, el cual indica el número de rpm por cada voltio que se proporciona al actuador (rpm/v). No obstante, a mayores valores de kv, menores valores de par y viceversa. Por lo tanto se deben tener en cuenta las características del robot<sup>99</sup>.

Los motores tienen tres bobinados que se encuentran conectados entre sí, formando una conexión en estrella o delta que termina en tres cables para la conexión con el ESC. El ESC es una tarjeta electrónica programable que cumple la función de controlar y energizar los bobinados del motor dependiendo de una señal de entrada PWM. Entre mayor sea el ciclo de utilidad de la señal, mayor será la velocidad. En la figura 125 se ve un ESC con su tarjeta programadora.

---

<sup>99</sup> BUENO, Diego. Motor eléctrico brushless: Funcionamiento y características. [en línea]. [consultado 6 de Octubre de 2015]. p. 1-7. Disponible en: <<https://1mecanizadoelarenal.files.wordpress.com/2013/11/motores-brushless.pdf>>

Figura 125. ESC con tarjeta programadora.



Fuente: HOBBYKING. Turnigy AquaStar 120A Watercooled ESC w/Programming Card.

Para el proyecto se seleccionó el motor HexTronikBrushless Outrunner 2300kv, que tiene un consumo máximo de 8.5 A y se puede alimentar hasta con 7 V. El motor brushless que se ve en la figura 126 se seleccionó debido a que se ajusta a las características del cuerpo del robot y además no añade mucho peso. El par generado es suficiente si se tiene en cuenta que la resistencia del fluido sobre el cual se desplaza el robot es poca. Por otro lado, la tarjeta electrónica Hobby King 20A ESC 3A UBEC es el controlador escogido al ser la única recomendación del distribuidor del motor. Puede ser alimentada con una batería LiPo de 2 o 4 celdas.

Figura 126. Motor Brushless seleccionado.



Fuente: Propia del autor.

#### 4.4.2.1 Configuración del ESC

Antes de conectar el ESC al motor y una batería, éste debe ser configurado porque no tiene definidos los parámetros de funcionamiento. Para configurar el ESC hace falta una tarjeta programadora que permite ajustar los parámetros manualmente, aunque no es la única forma de configurarlo. En la tabla 40 se muestran los parámetros que se pueden configurar con la descripción. También se necesita hacer la conexión del motor, el ESC y la batería antes de hacer la configuración, así como se ve en la figura 127.

Tabla 40. Parámetros a configurar.

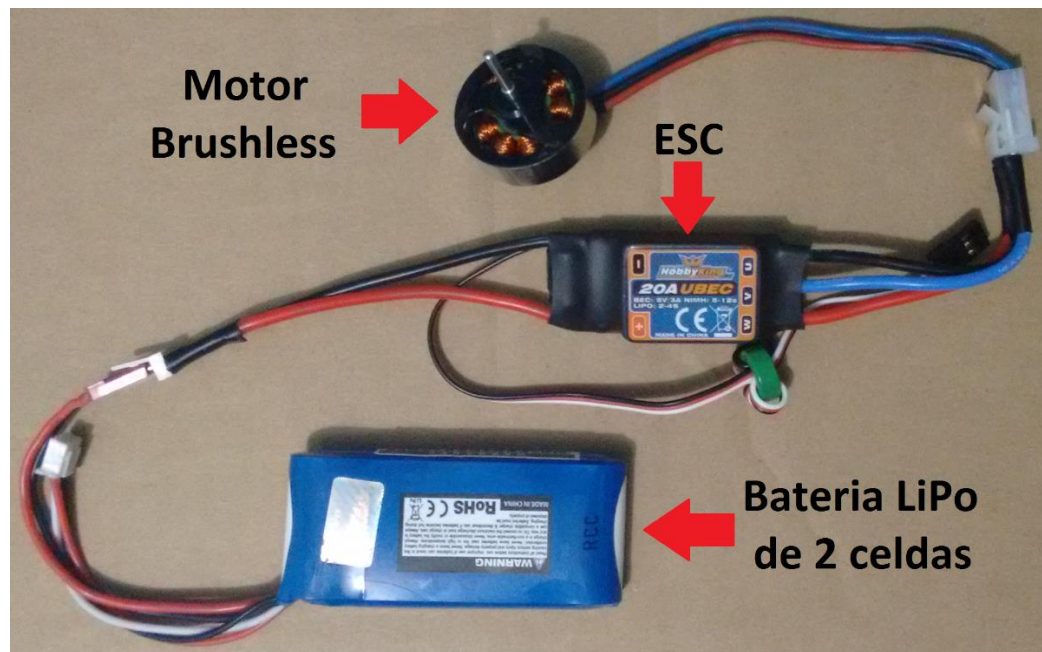
| PARAMETRO          | OPCION       | DESCRIPCION                                                      |
|--------------------|--------------|------------------------------------------------------------------|
| Batería            | NiMH         | Batería de níquel-metal hidruro                                  |
|                    | LiPo         | Batería de polímero de litio                                     |
| Modo de gobernador | Rpm off      | Control de rpm apagado                                           |
|                    | First range  | Retardo de 5 segundos desde el inicio al máximo de rpm           |
|                    | Second range | Retardo de 15 segundos desde el inicio al máximo de rpm          |
| Arranque           | Very soft    | Arranque lento e incremental de 1.5 segundos hasta el máximo rpm |

|                     |              |                                                                                  |
|---------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|                     | Soft         | Arranque lento e incremental de 1 segundo hasta el máximo rpm                    |
|                     | Start ACC    | Arranque con aceleración rápida                                                  |
| Freno               | On           | Se detiene inmediatamente                                                        |
|                     | Off          | Se detiene naturalmente                                                          |
| Sincronización      | Auto         | Determina automáticamente la sincronización optima                               |
|                     | Low 7 – 22   | Ajuste para motores con 2 polos                                                  |
|                     | High 22 – 30 | Ajuste para motores con 6 o más polos                                            |
| Rotación            | Forward      | Sentido horario para avance                                                      |
|                     | Reverse      | Sentido anti-horario para retroceso                                              |
| Cortar tensión      | 2.8 v / 50%  | Corta la tensión cuando las celdas de la batería LiPo están en 2.8 v o menor     |
|                     |              | Corta la tensión cuando la batería Ni-MH está al 50% o menos del voltaje inicial |
|                     | 3.0 v / 60%  | Corta la tensión cuando las celdas de la batería LiPo están en 3.0 v o menor     |
|                     |              | Corta la tensión cuando la batería Ni-MH está al 60% o menos del voltaje inicial |
|                     | 3.2 v / 65%  | Corta la tensión cuando las celdas de la batería LiPo están en 3.2 v o menor     |
|                     |              | Corta la tensión cuando la batería Ni-MH está al 65% o menos del voltaje inicial |
| Cortar alimentación | Reduce       | Se reduce la alimentación del motor cuando se alcanza el nivel de baja tensión   |
|                     | Stop         | Se corta la alimentación del motor cuando se alcanza el nivel de baja tensión    |

Fuente: HOBBYKING. 20A UBEC – 30A UBEC.



Figura 127. Conexión del motor, el ESC y la batería.



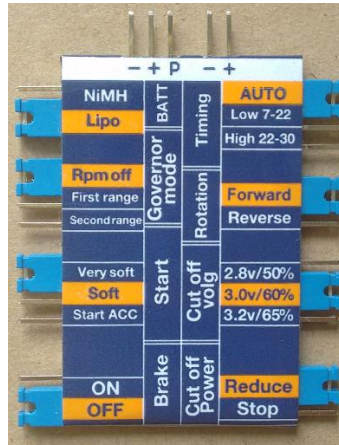
Fuente: Propia del autor.

A continuación se presentan los pasos para configurar los parámetros mostrados en la tabla anterior.

- Como primer paso, se deben seleccionar los parámetros manualmente en la tarjeta programadora. En la figura 128 se ve un ejemplo de configuración.
- Conectar la tarjeta programadora al ESC como se ve en la figura 129, y esperar a que se escuchen dos tonos, es ahí cuando se ha cargado la configuración.

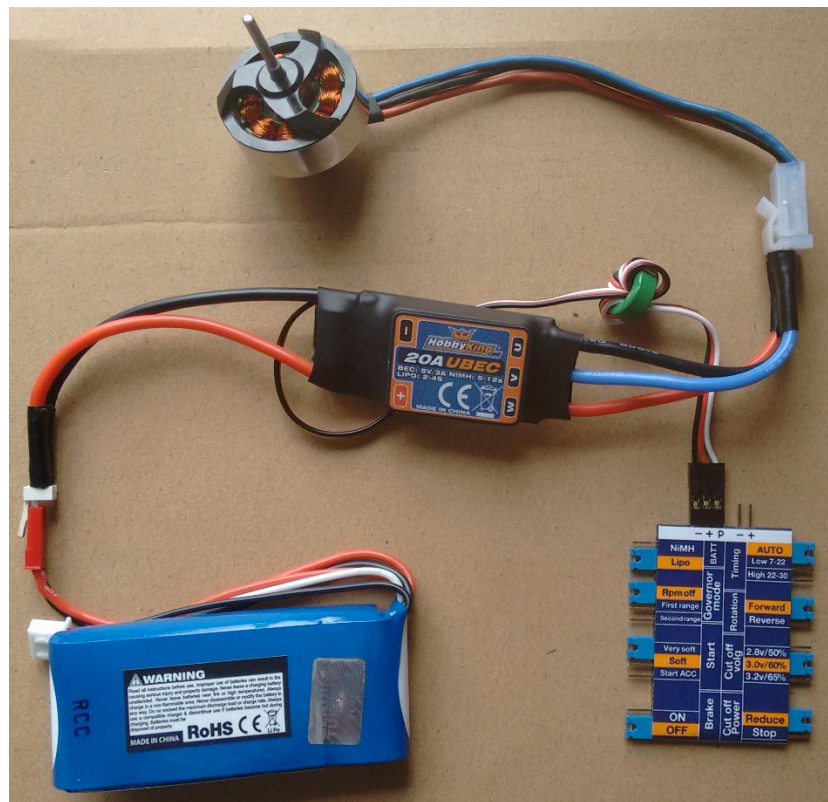


Figura 128. Ejemplo de configuración tarjeta programadora.



Fuente: Propia del autor.

Figura 129. Conexión de la tarjeta programadora al ESC.



Fuente: Propia del autor.

- Por último, desconectar la batería y posteriormente la tarjeta programadora. Si se quiere cargar una configuración diferente, se debe conectar primero la batería y luego la tarjeta con la configuración nueva.

#### 4.4.3 Servomotor

Un servomotor es un encapsulado que contiene un motor DC, un circuito de control de posición, engranajes para reducción de velocidad y aumento de torque, y un sensor de rotación o potenciómetro, como se ve en la figura 130. Tiene tres cables para la alimentación y señal de control (Vcc, tierra y señal de entrada PWM). Los servomotores funcionan con una señal de 50 Hz donde el ancho de cada pulso determina la posición del eje. Existen servomotores que tienen una rotación de 90°, 180° o 360°. Son usados en aplicaciones de radio control como en aeromodelismo

Figura 130. Partes de un servomotor.

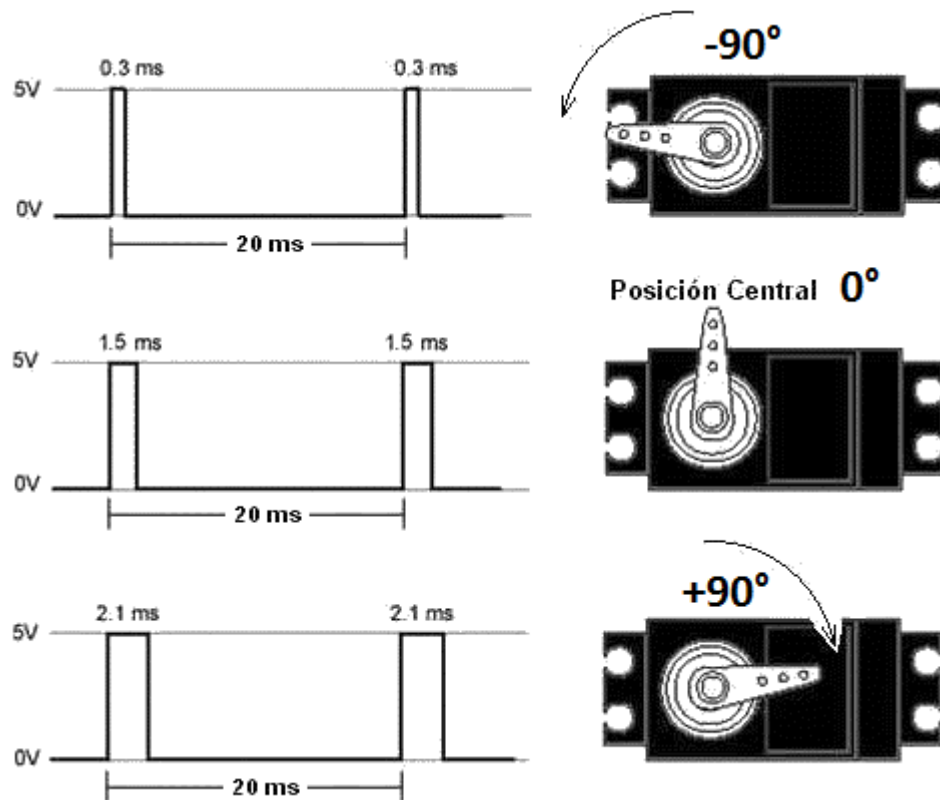


Fuente: ROBOTICAPY. Servos.

Los servomotores no requieren de una tarjeta de potencia entre el microcontrolador o tarjeta de desarrollo que genera la señal PWM y los terminales de alimentación. En la figura 131 se presenta un ejemplo del funcionamiento de la

rotación de un servomotor. Sin embargo, según Thomas Bräunl<sup>100</sup>, los servomotores presentan una desventaja, pues no proporcionan ninguna retroalimentación a la salida, es decir que no es posible saber si el servomotor alcanza la posición deseada. Los problemas de una carga demasiado grande u obstrucciones son un ejemplo de como un servomotor puede no funcionar como se espera.

Figura 131. Rotación de un servomotor.



Fuente: ROBOTICAPY. Servos.

Para el proyecto es necesaria la integración de un servomotor por robot que cumpla la función de dar dirección cuando se esté desplazando. Como la tarea a

<sup>100</sup>BRÄUNL. Op. cit., p. 49.

cumplir por el servomotor no requiere de un gran torque o de un giro mayor a 180°, se decide usar el micro servomotor Tower Pro SG90, el cual entrega un torque de 1.8 Kg/cm a una velocidad de 0.1s/60° y con una rotación de 180°.

#### 4.5 BATERIAS

El uso de dispositivos electrónicos y actuadores eléctricos demanda la integración de fuentes de energía suficientes para su funcionamiento. Hay que tener presente que no todos los componentes se deben alimentar con una batería y es por esto que se dividen en circuitos de control y sensores, y circuitos de potencia y actuadores. Normalmente, los circuitos de control y sensores tienen un consumo de corriente menor en comparación con los circuitos de potencia y actuadores. Si se alimentan con una sola batería, se corre el riesgo de que la corriente requerida por los circuitos de potencia y actuadores estropee los circuitos de control y sensores.

La batería<sup>101</sup> es un elemento que acumula energía eléctrica mediante un proceso electroquímico. Es usada como fuente de energía secundaria ya que suministra la energía eléctrica que se almacena con anterioridad durante un proceso de carga. Son la opción más implementada en robótica móvil ya que otorga libertad de movimiento aunque el funcionamiento se limita al tiempo que tarde en entregar la energía. Existen distintos tipos de baterías como la de plomo-ácido (Pb-ácido), níquel-cadmio (NiCd), níquel-hidruro metálico (NiMH), ion-litio (Li-Ion), polímero-litio (Li-Poly) y Aire-zinc. En la tabla 41 se presentan algunos tipos de baterías comerciales y sus características.

---

<sup>101</sup> GIL, Isaac. DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDOBASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS. [en línea]. [consultado 13 de Octubre de 2015]. p. 20-31. Disponible en: <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4740/fichero/2.+Baterias+y+Supercondensadores.pdf>>

Tabla 41. Características de baterías comerciales.

| Tipo de batería | Densidad de energía Wh/kg | Voltaje por celda V | Ciclos de recarga | Porcentaje de auto-descarga mensual % | Observaciones              |
|-----------------|---------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Pb-ácido        | 30 – 50                   | 2                   | 1000              | 5                                     | Pesadas Económicas         |
| NiCd            | 48 – 80                   | 1.25                | 500               | 30                                    | Alta descarga Poco peso    |
| NiMH            | 60 – 120                  | 1.25                | 1000              | 20                                    | Alta auto-descarga         |
| Li-ion          | 110 – 160                 | 3.16                | 4000              | 25                                    | Poco peso Alto costo       |
| Li-poly         | 100 – 130                 | 3.7                 | 5000              | 10                                    | Larga vida útil Alto costo |

Fuente: Tecnología de las baterías.

La selección de las baterías está definida por los valores de voltaje y corriente que necesitan los circuitos de control y sensores, y los circuitos de potencia y actuadores. Según la tabla 42, los componentes de control y sensores consumen una corriente aproximada de 245.1 mA a un voltaje de 5 V máximo, mientras que los demás componentes consumen una corriente de 29 A a un voltaje de 7.4 V máximo.

Tabla 42. Características de los elementos seleccionados.

| Circuitos de control y sensores |           |                | Circuitos de potencia y actuadores |           |                |
|---------------------------------|-----------|----------------|------------------------------------|-----------|----------------|
| Componente                      | Corriente | Voltaje típico | Componente                         | Corriente | Voltaje típico |
| GY-273                          | 100 uA    | 5 V            | Brushless 2300 kv                  | 8.5 A     | 5 V            |
| GY-GPS6MV2                      | 45 mA     | 5 V            |                                    |           |                |
| GP2Y0D815Z0F                    | 5 mA X 2  | 5 V            | Micro-servo                        | 500 mA    | 5 V            |

|                |          |       |               |      |       |
|----------------|----------|-------|---------------|------|-------|
| XBee S2        | 40 mA    | 3.3 V | SG90          |      |       |
| Adaptador XBee | 150 mA   | 5 V   | ESC           | 20 A | 7.4 V |
| <b>Total:</b>  | 245.1 mA | 5 V   | <b>Total:</b> | 29 A | 7.4 V |

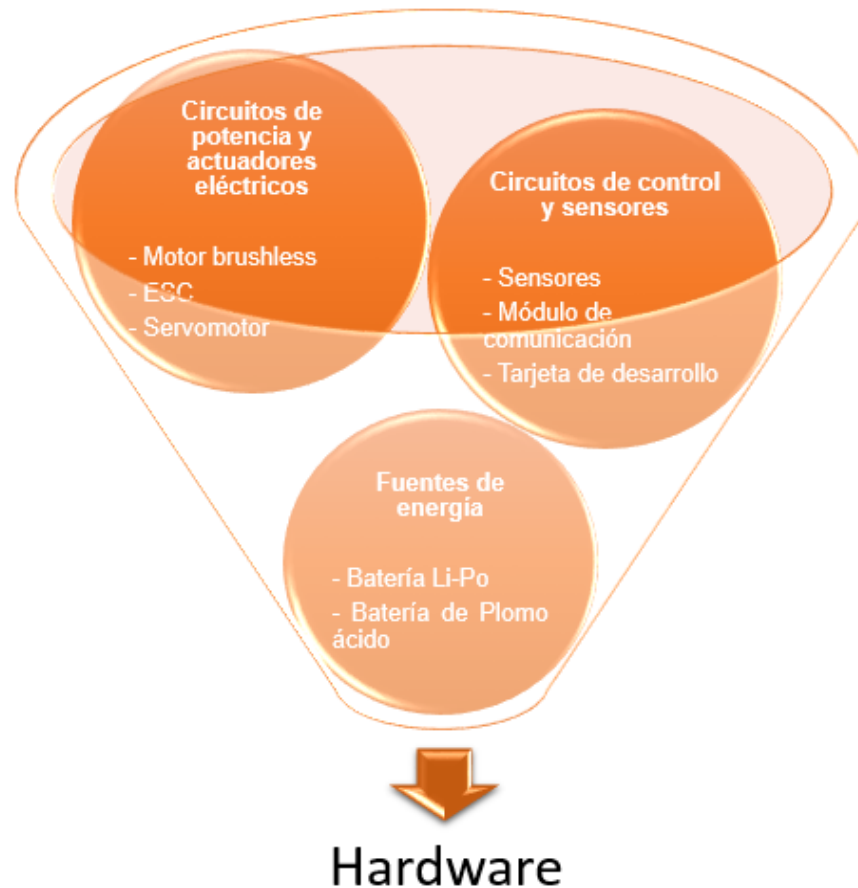
Fuente: Propia del autor.

Para los circuitos de control y sensores se decide usar una batería de plomo-ácido de 6 V y 1.3 Ah y para los circuitos de potencia y actuadores se decide usar una batería de Li-Po de 7.4 V y 1 Ah con 20 – 30 C. La batería de plomo-ácido tiene la menor densidad de energía de todos los tipos de baterías comerciales, pero es una batería económica que puede suministrar hasta cinco veces la corriente que se necesita, lo que se traduce en un funcionamiento continuo por más tiempo. Por otro lado, la batería Li-Po tiene una de las densidades de energía más altas, posee la propiedad en entregar hasta 20 veces (20 C) la corriente de forma continua o 30 veces (30 C) en un tiempo corto y es recomendada al usar un ESC.

#### 4.6 DISEÑO DE HARDWARE

Los dispositivos seleccionados y nombrados anteriormente deben tener una estructura de conexión apropiada e igual para cada robot acuático. A esto se ha decidido nombrar como el diseño de hardware, además de añadir circuitos necesarios para su correcto funcionamiento. Los componentes seleccionados son divididos en tres grupos: circuitos de control y sensores, circuitos de potencia y actuadores eléctricos y fuentes de energía, así como se ve en la figura 132.

Figura 132. Grupos de componentes.

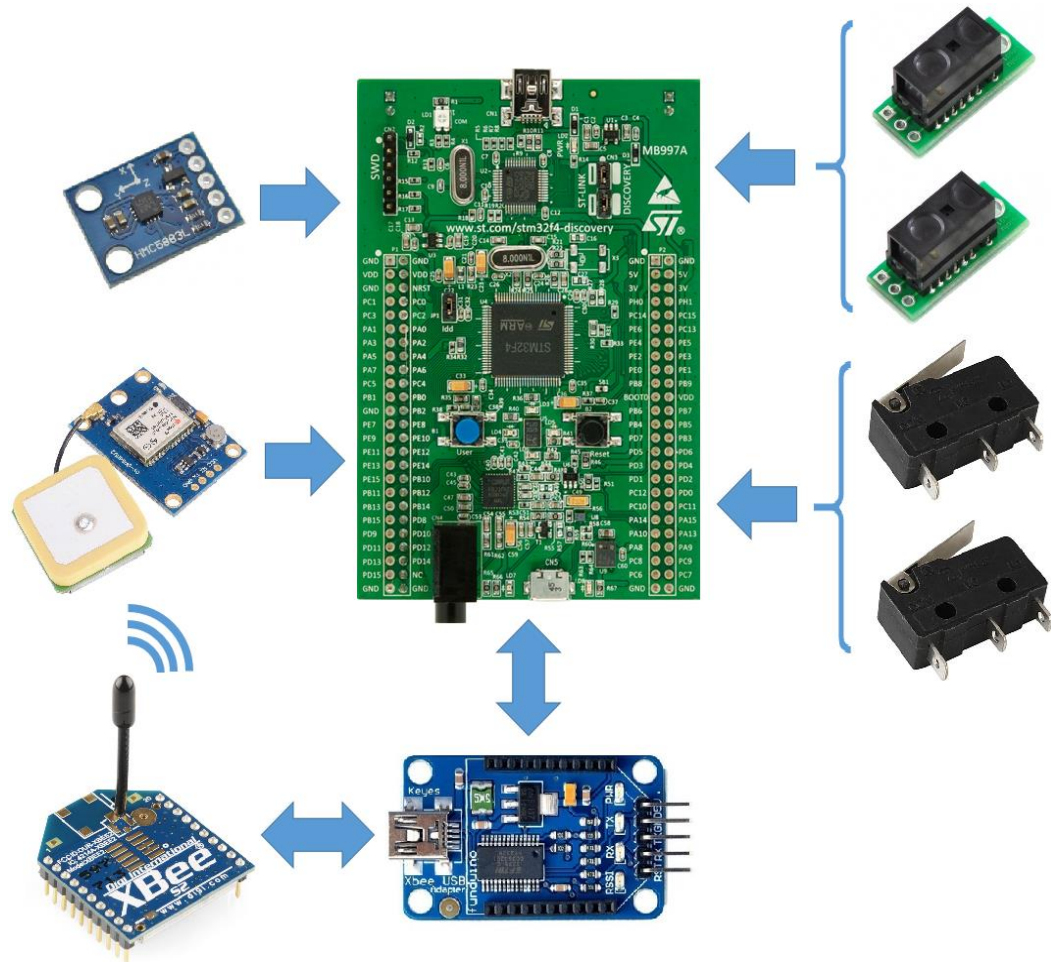


Fuente: Propia del autor.

#### 4.6.1 Circuitos de control y sensores

Dentro de este grupo se encuentran los sensores GY-273, GY-GPS6MV2, GP2Y0D815Z0F, los interruptores, el módulo de comunicación inalámbrica XBee S2 con su adaptador y la tarjeta de desarrollo STM32F4 DISCOVERY. La arquitectura que se muestra en la figura 133 hace referencia a las conexiones entre los dispositivos mencionados anteriormente, siendo la tarjeta de desarrollo el centro de control donde llega la información de los sensores y los datos transmitidos por otros robots, o desde donde se envían los datos a los demás.

Figura 133. Arquitectura de conexión de los circuitos de control y sensores.



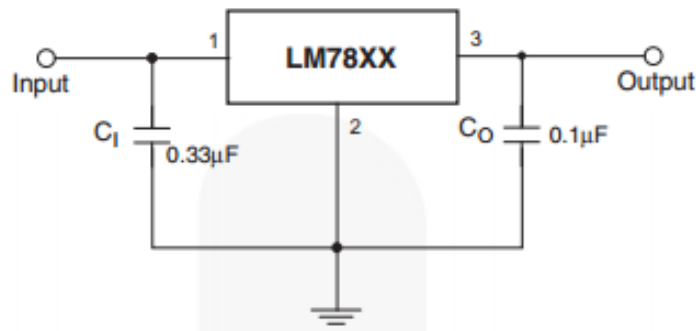
Fuente: Propia del autor.

La fuente de alimentación escogida para este grupo de componentes es la batería de plomo-ácido de 6 V, por esto se decidió añadir una etapa de regulación de voltaje usando el regulador LM7805 en configuración de regulador fijo, capaz de proporcionar una corriente de 1 A. El diagrama electrónico del circuito se ve en la figura 134. Esto permite que los componentes sean alimentados con un voltaje que esté dentro del rango especificado en las hojas de datos, evitando daños en



los circuitos internos por sobre-voltaje. El LM7805<sup>102</sup> funciona con un voltaje de entrada entre 7 – 20 V para una regulación de 5 V, aunque para voltajes de entrada entre 5 – 6 V el voltaje regulado es de 4.75 V como mínimo.

Figura 134. Circuito para la regulación de voltaje usando el LM7805.



Fuente: FAIRCHILD. LM78XX / LM78XXA 3 – Terminal 1 A Positive Voltage Regulator.

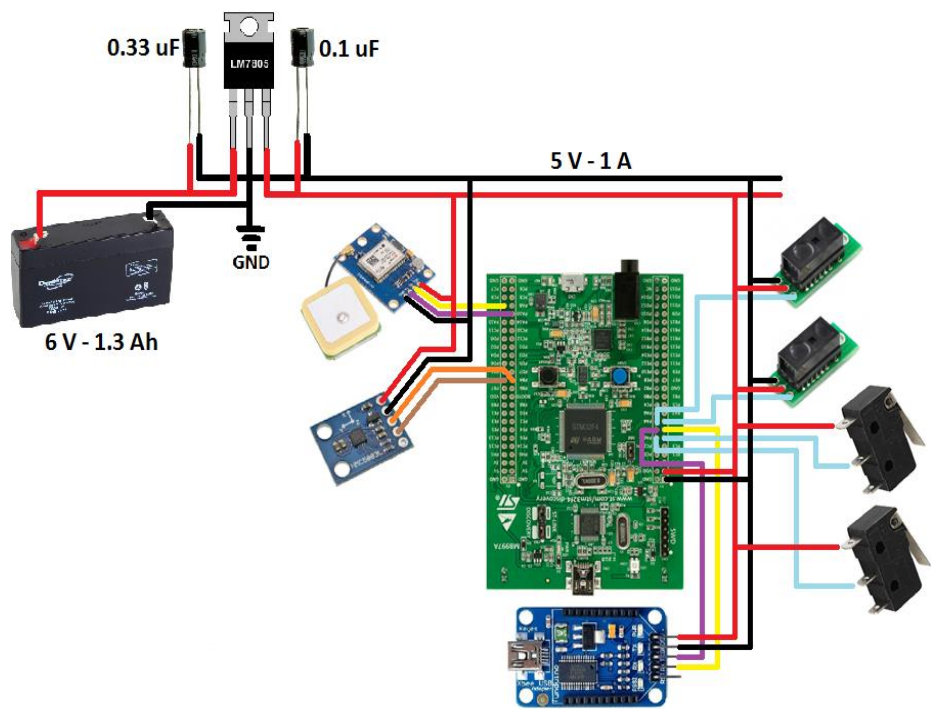
El módulo de comunicación XBee serie 2<sup>103</sup> tiene como límite un voltaje de alimentación de 3.6 V. Para evitar añadir otra etapa de regulación, se usa el adaptador utilizado en la configuración del XBee ya que posee un circuito de regulación a 3.3 V. En la figura 135 se presenta la conexión electrónica de los circuitos de control y sensores. En la tabla 43 se especifican las conexiones de los sensores y el adaptador XBee con la tarjeta STM32F4 DISCOVERY.

---

<sup>102</sup> FAIRCHILD. LM78XX/ LM78XXA 3-Terminal 1 A Positive Voltage Regulator. [en línea]. Septiembre 2014. [consultado 14 de Octubre de 2015]. p. 1-24. Disponible en: <<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM7805.pdf>>

<sup>103</sup> DIGI INTERNATIONAL. XBee/XBee-PRO ZigBee RF Modules User Guide. [en línea]. Marzo 2015. [consultado 7 de Septiembre de 2015]. p. 1-198. Disponible en: <[http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976\\_W.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_W.pdf)>

Figura 135. Diagrama de conexión de los circuitos de control y sensores.



Fuente: Propia del autor.

Tabla 43. Conexión de los circuitos de control y sensores.

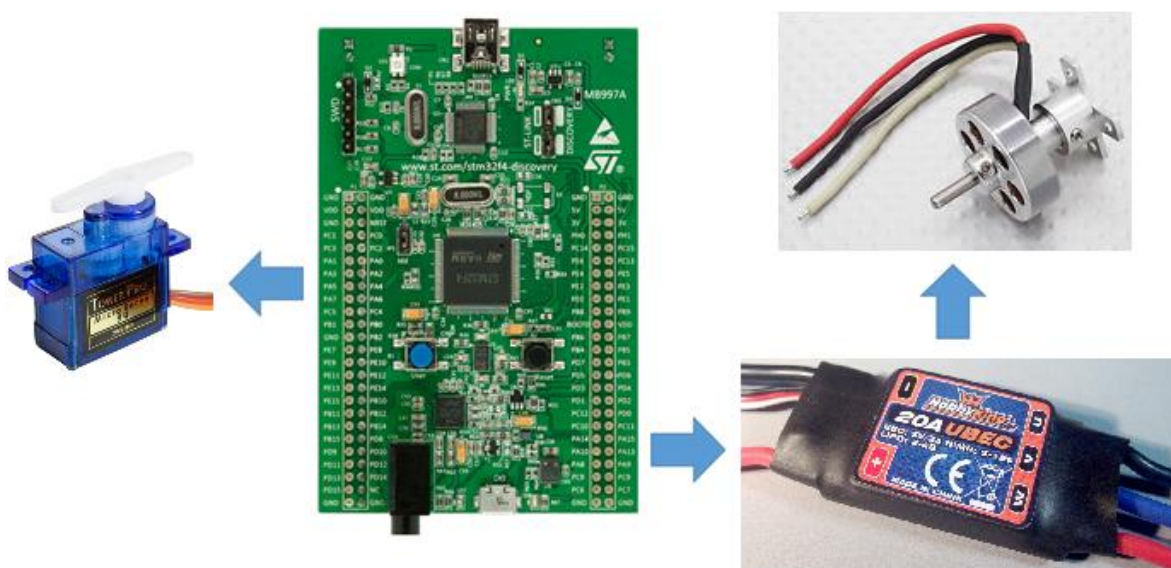
| Dispositivo      | Pin | Pin STM32F4 DISCOVERY |
|------------------|-----|-----------------------|
| GY-GPS6MV2       | Rx  | PA9                   |
|                  | Tx  | PA10                  |
| GY-273           | SCL | PB4                   |
|                  | SDA | PB5                   |
| GP2Y0D815Z0F (1) | OUT | PA0                   |
| GP2Y0D815Z0F (2) | OUT | PA1                   |
| Interruptor (1)  | NO  | PA4                   |
| Interruptor (2)  | NO  | PA5                   |
| Adaptador XBee   | Rx  | PA3                   |
|                  | Tx  | PA2                   |

Fuente: Propia del autor.

#### 4.6.2 Circuitos de potencia y actuadores eléctricos

Dentro de este grupo se encuentran el ESC Hobby King 20A ESC 3A UBEC, el motor HexTronikBrushless Outrunner 2300kv y el micro servomotor Tower Pro SG90. Su arquitectura y conexión es más sencilla que la de los circuitos de control y sensores. En la figura 136 se ve la arquitectura de conexión donde la tarjeta STM32F4 DISCOVERY envía las señales PWM necesarias para el funcionamiento de los actuadores eléctricos.

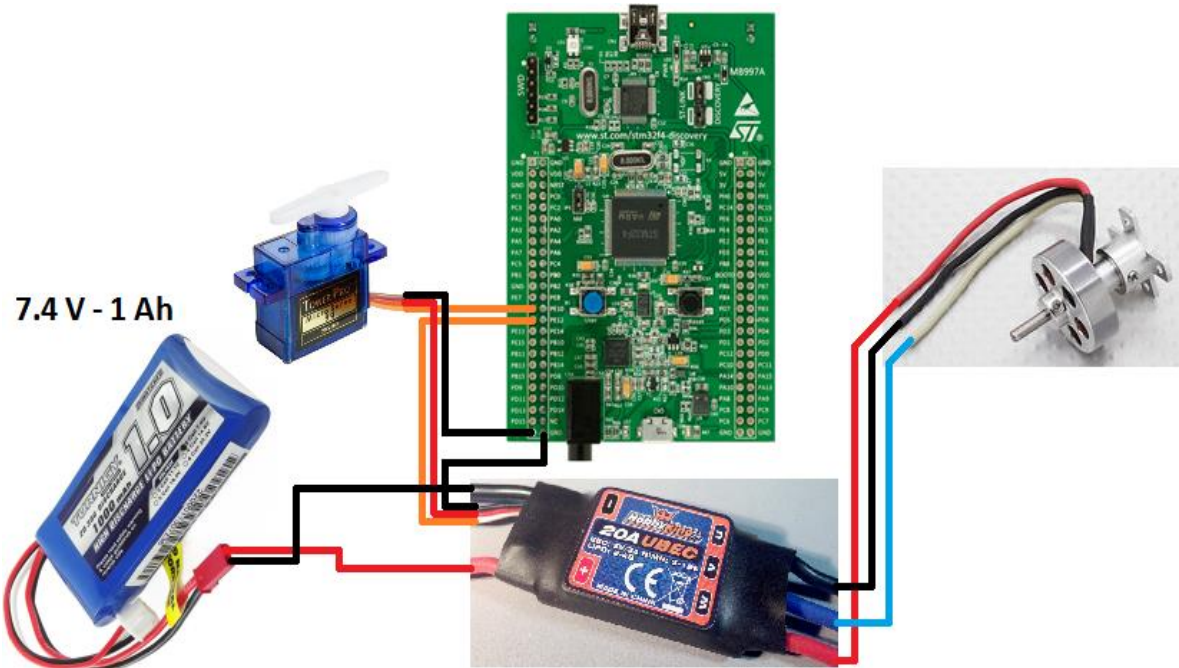
Figura 136. Arquitectura de conexión de los circuitos de potencia y actuadores.



Fuente: Propia del autor.

La batería Li-Po de 2 celdas (7.4 V) es la fuente de alimentación escogida para este grupo de dispositivos y no se conecta a la tarjeta de desarrollo. Sin embargo, la línea GND del ESC se conecta al pin GND de la tarjeta para la polarización de los circuitos. El ESC tiene internamente un circuito de regulación de voltaje que se conecta a una línea de alimentación bidireccional, la cual puede ser usada para suministrar el voltaje regulado (5 V) a circuitos o actuadores externos como por ejemplo el micro servomotor. Los circuitos de potencia y actuadores se conectan como se ve en la figura 137. En la tabla 44 se especifican las conexiones del ESC y el micro servomotor con la tarjeta STM32F4 DISCOVERY.

Figura 137. Diagrama de conexión de los circuitos de potencia y actuadores.



Fuente: Propia del autor.

Tabla 44. Conexión de los circuitos de control y sensores.

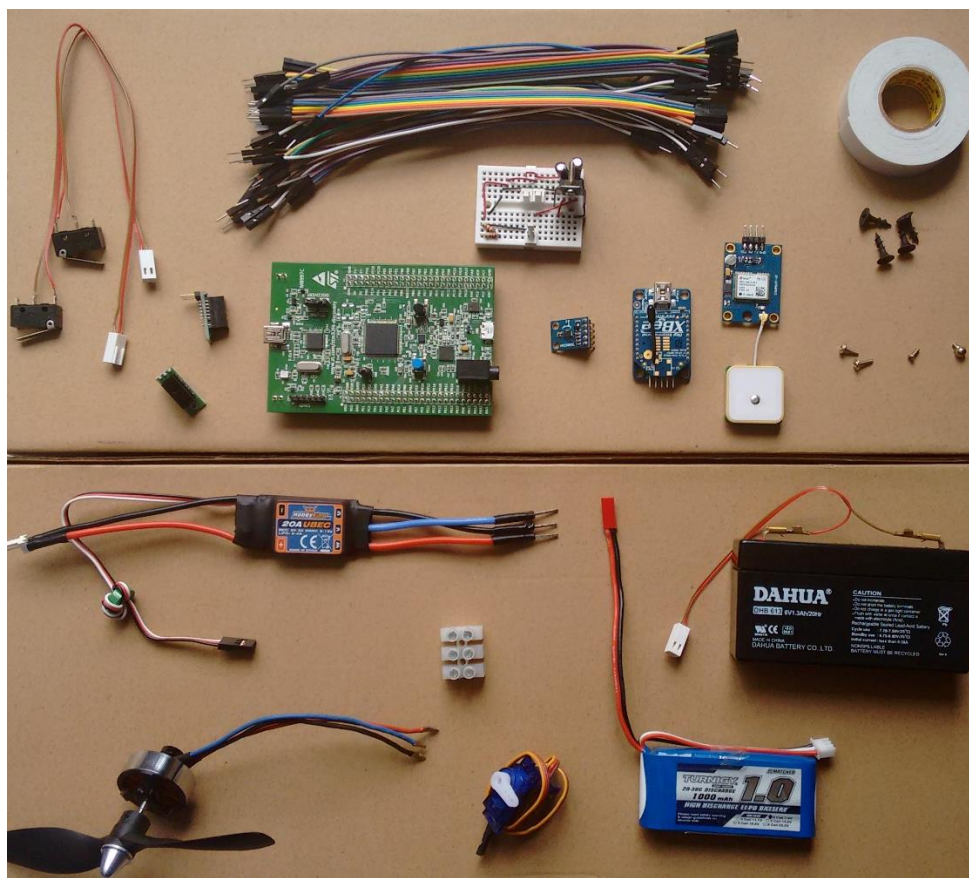
| Dispositivo                       | Pin                          | Pin STM32F4<br>DISCOVERY |
|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Micro servomotor<br>SG90          | Señal PWM<br>(cable naranja) | PE11                     |
| ESC Hobby King 20A<br>ESC 3A UBEC | Señal PWM<br>(cable blanco)  | PE9                      |

Fuente: Propia del autor.

## 5. CAPITULO. INTEGRACION DE LOS CIRCUITOS ELECTRONICOS

En este capítulo se presenta la integración de los componentes electrónicos y los actuadores a la estructura del robot. Como los elementos a integrar añaden peso, se tiene en cuenta el lugar donde se ubican para distribuirlo de la mejor forma y evitar un posible hundimiento. En la figura 138 se ven los elementos usados en la integración.

Figura 138. Elementos usados en cada robot.



Fuente: Propia del autor.

En primer lugar son instalados los actuadores eléctricos en los espacios asignados según el fabricante del cuerpo del robot. La estructura tiene un espacio



en la base para ubicar el servomotor y algunos elementos pequeños. Hay una lámina plástica para sujetar el servomotor con un par de tornillos y tiene una tapa para proteger los elementos de salpicaduras de agua. Después de sujetar el servomotor, se une a un extremo del alambre que está unido con las paletas de dirección a una pequeña pieza del servomotor (mecanismo de transmisión de movimiento). En la figura 139 se ve la instalación del servomotor.

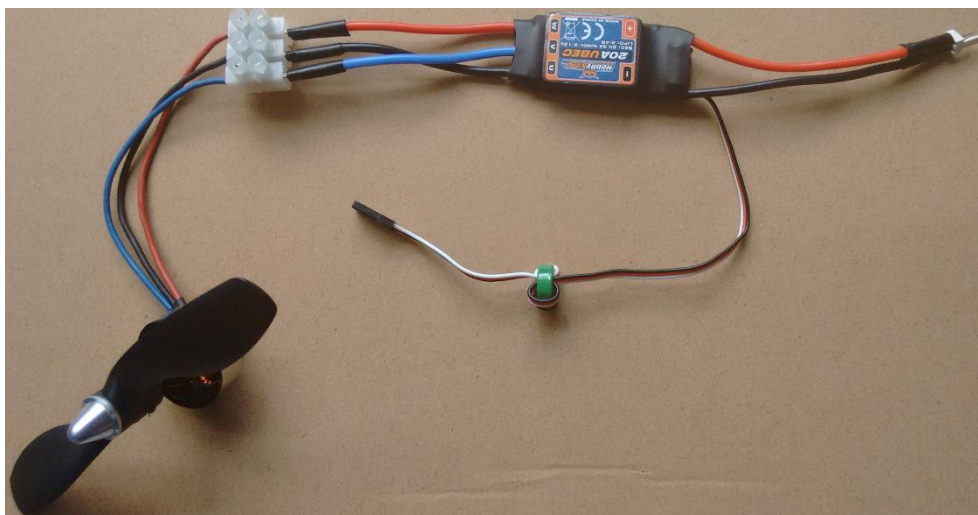
Figura 139. Instalación del servomotor.



Fuente: Propia del autor.

Seguido se conecta el ESC con el motor brushless usando un conector de cable de tres líneas como se ve en la figura 140. El cuerpo del robot tiene una pequeña estructura para ubicar el motor brushless en la parte trasera de la base, donde se sujeta con un par de tornillos como se ve en la figura 141. El conector de cable se pega a la base con un pedazo de cinta adhesiva doble faz.

Figura 140. Conexión del EXC y el motor brushless.



Fuente: Propia del autor.

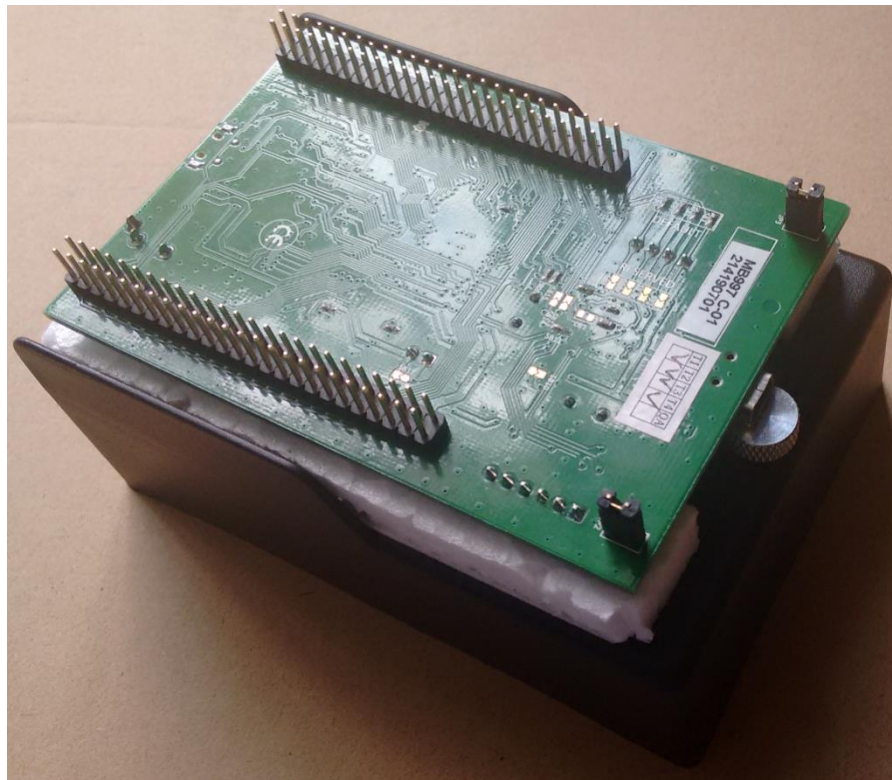
Figura 141. Instalación del motor brushless.



Fuente: Propia del autor.

El cuerpo del robot presenta una inclinación al estar en el agua haciendo que la parte de atrás se sumerja más que la parte de adelante, por esto se decide ubicar los componentes desde el centro hacia adelante para evitar que el peso hunda el robot. La tarjeta de desarrollo se ubica en la parte superior de la tapa que cubre el servomotor y se usan dos pedazos de icopor para poner la tarjeta y evitar que se mueva, como se ve en la figura 142.

Figura 142. Instalación de la tarjeta de desarrollo.

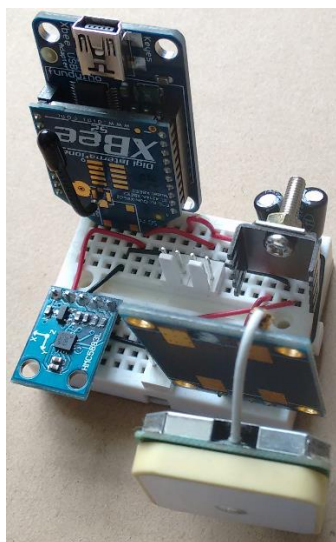


Fuente: Propia del autor.

La brújula digital, el GPS y el módulo de comunicación se conectan a una protoboard que además tiene el circuito de regulación de voltaje con el componente LM7805 (figura 143). El uso de la protoboard hace que los circuitos de control y sensores sean fáciles de conectar y ajustar, además de tener líneas libres para añadir algún otro elemento. La protoboard se pega con cinta adhesiva doble faz sobre la tarjeta de desarrollo como se ve en la figura 144.

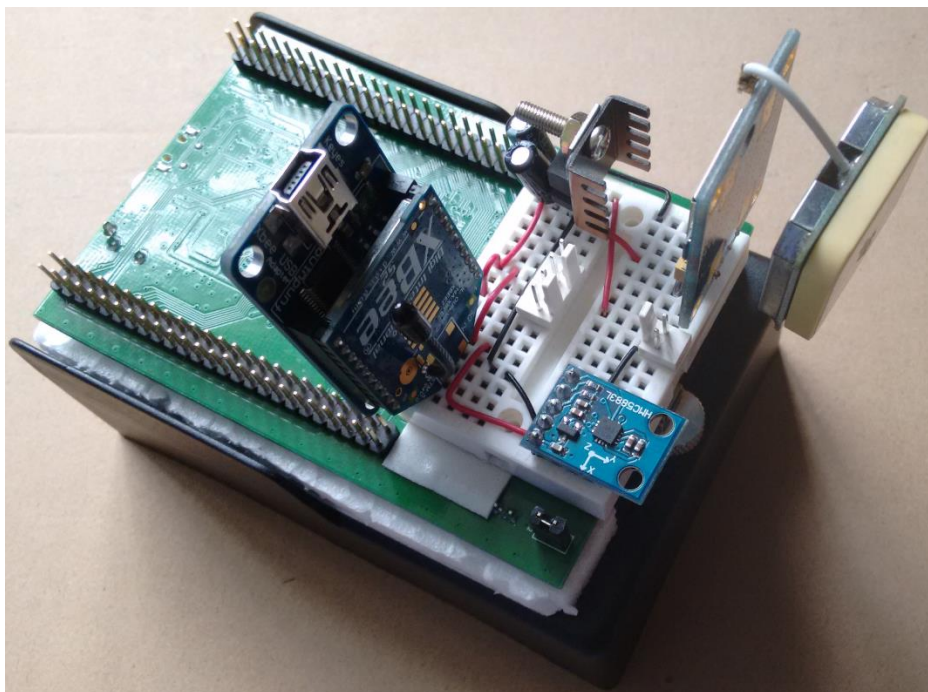


Figura 143. Protoboard con circuito de regulación de voltaje, sensores y XBee.



Fuente: Propia del autor.

Figura 144. Montaje de la protoboard.



Fuente: Propia del autor.

Cada embarcación tiene una rejilla para cubrir el motor brushless como las que usan los hidrodeshlizadores de los pantanos. La rejilla puede ponerse sin necesidad de tornillos y es un accesorio que no tiene mayor relevancia en el proyecto, sin embargo es instalada como se ve en la figura 145.

Figura 145. Rejilla de protección del hidrodeshlizador.



Fuente: Propia del autor.

Los sensores infrarrojos y de contacto (interruptores) son ubicados a cada lado y al frente de la base como se ve en la figura 146. De ésta forma el robot podrá sensar los objetos que se encuentren a su alrededor mientras que se desplaza cumpliendo con la subtaska de búsqueda.

Figura 146. Sensores infrarrojos y de contacto sobre el hidrodeshlizador.



Fuente: Propia del autor.

Aprovechando un poco el espacio que queda, la batería de plomo ácido se ubica en la parte delantera de la base dándole estabilidad al robot. La figura 147 muestra la posición en la que se ubica la batería. Cabe aclarar que no hay problema con la posición de la batería ya que su material interno lo permite, aunque no todas las baterías de plomo ácido se puedan girar ya que algunas presentan fugas al hacerlo.

Figura 147. Ubicación de la batería sobre la embarcación.



Fuente: Propia del autor.

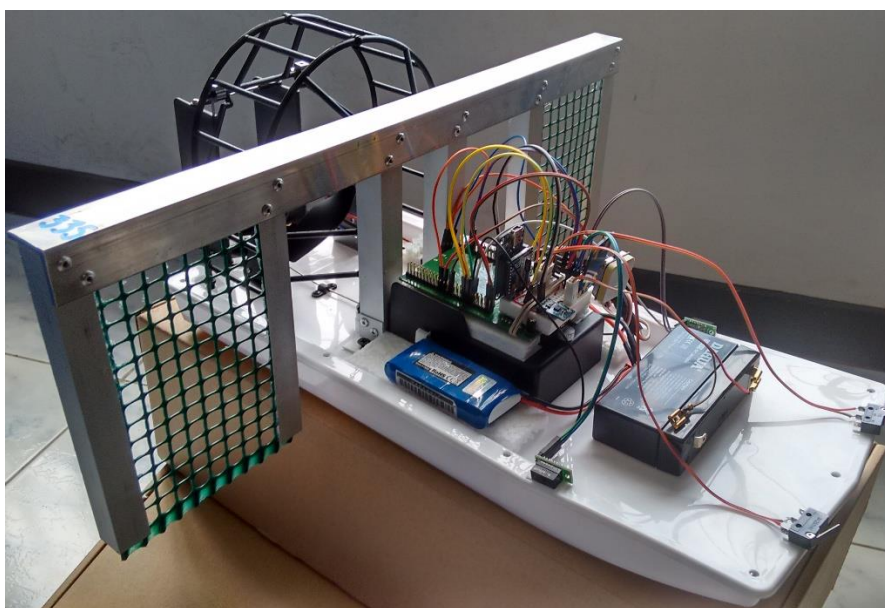
La estructura diseñada para arrastrar los objetos durante la subtask de transporte se ubica en el espacio que hay entre la rejilla y la tapa donde está la tarjeta de desarrollo. Se usan tornillos para la instalación y en la figura 148 se ven los orificios en el espacio anteriormente descrito. La figura 149 muestra el robot terminado luego de hacer las conexiones entre los circuitos electrónicos, los sensores, los actuadores y las baterías.

Figura 148. Orificios para la instalación de la rejilla de arrastre.



Fuente: Propia del autor.

Figura 149. Robot terminado.



Fuente: Propia del autor.



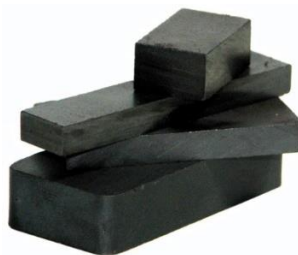
Por último, para realizar el transporte del objeto encontrado en conjunto por los dos robots (el que encontró el objeto y el que se desplazó a ayudarlo) se emplearan imanes localizados en dos partes a cada lado de la estructura de recolección que ayudaran a emparejar los robots para seguir una misma trayectoria hasta alcanzar un punto donde dejaran el objeto. El uso de imanes se escogió debido a la simpleza mecánica que ofrecen para la tarea.

Se utilizan dos tipos de imanes, los cerámicos (Figura 150) y de Neodimio (Figura 151), debido a la fuerza magnética de cada uno. Los cerámicos no son tan fuertes como los de neodimio debido a los compuestos y procesos con lo que están fabricados.

Los imanes de neodimio forman parte de la familia de imanes de tierras raras y son los más poderosos imanes permanentes en el mundo. También se conocen como los imanes de NdFeB porque se componen principalmente de neodimio (Nd), Hierro (Fe ) y el boro ( B ). Los imanes de neodimio son mucho más fuertes que los imanes de ferrita (cerámicos)<sup>104</sup>.

Los imanes cerámicos, también conocidos como imanes de ferrita, están fabricados de un compuesto de óxido de hierro y carbonato de bario/estroncio mediante tecnologías de procesamiento de cerámicas, y son la clase de imanes permanentes más barata, fácilmente procesable y con alta fuerza coercitiva<sup>105</sup>.

Figura 150. Imán cerámico o de ferrita.



Fuente: Quantum Ltda/ceramicos\_cuadrado.

---

<sup>104</sup> Disponible en internet: < <http://www.imanes123.com/informacion-de-iman-es-neodimio/>>

<sup>105</sup> Disponible en Internet: <[http://www.permanentmagnet.com/spain/ceramic\\_magnet\\_ferrite\\_magnet.html](http://www.permanentmagnet.com/spain/ceramic_magnet_ferrite_magnet.html)>

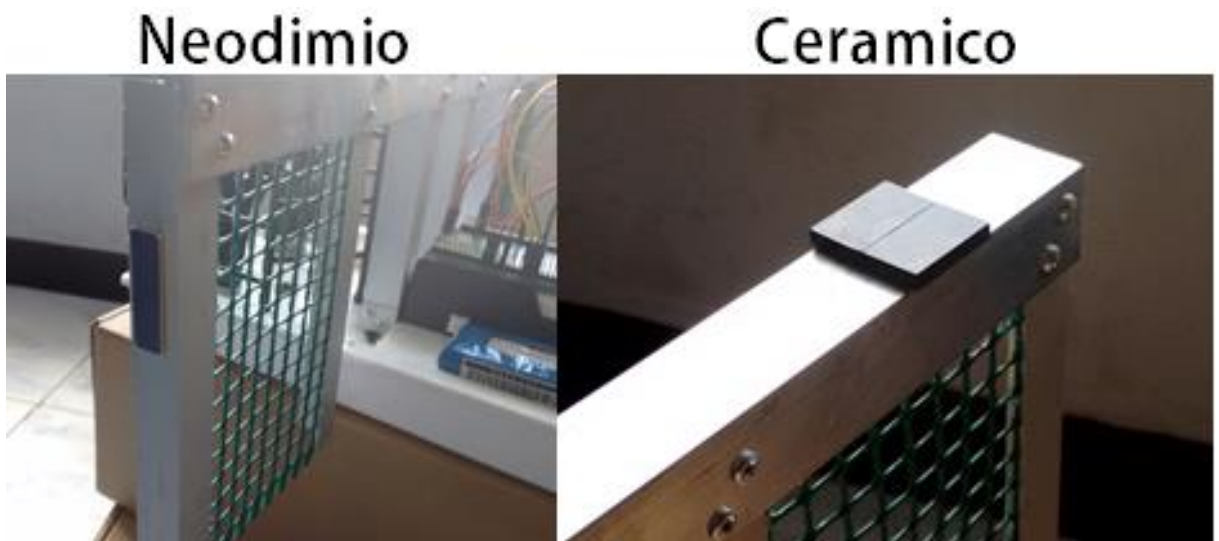
Figura 151. Imán de Neodimio.



Fuente: China Rare Earth Magnet Limited- Imanes de Neodimio.

Un imán cerámico se pone a cada lado sobre el perfil transversal de la estructura, y uno de neodimio a cada lado, del perfil externo como se aprecia en la figura 152. Se ubican de esta manera debido a su fuerza magnética, para evitar que al acercarse un barco con otro, los imanes de Neodimio ejerzan una gran fuerza que pueda hundir o volcar el barco.

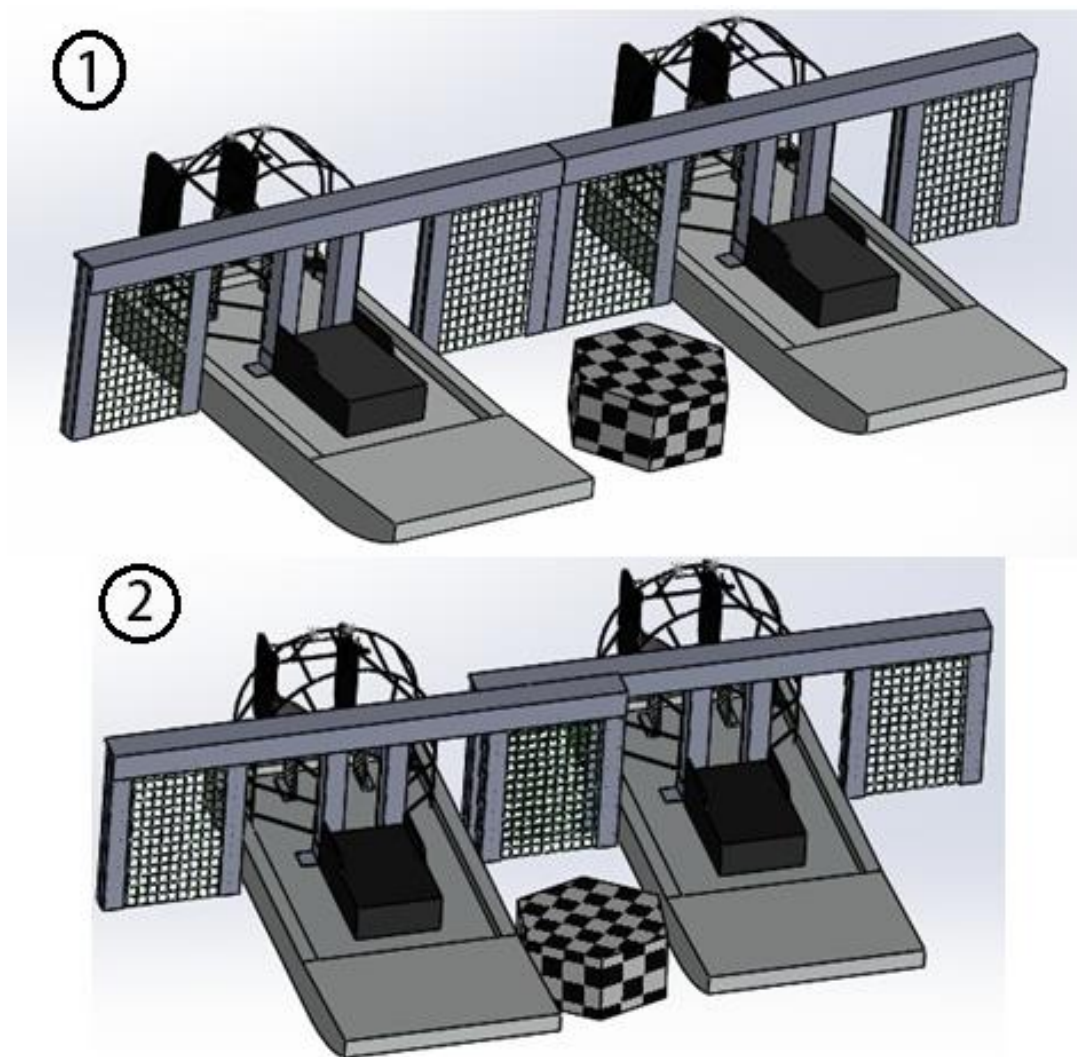
Figura 152. Imanes sobre la estructura de recolección.



Fuente: Propia del autor.

Teniendo en cuenta lo anterior, la alineación de los robots para arrastrar el objeto podría quedar de dos maneras, la primera al unirse los perfiles del lado con los imanes de Neodimio, y la segunda, al unirse por los imanes cerámicos ubicados sobre la transversal de la estructura de recolección lo que daría menos espacio entre los robots como se ve en la figura 153.

Figura 153. Posibles alineaciones de los robots.



Fuente: Propia del autor.

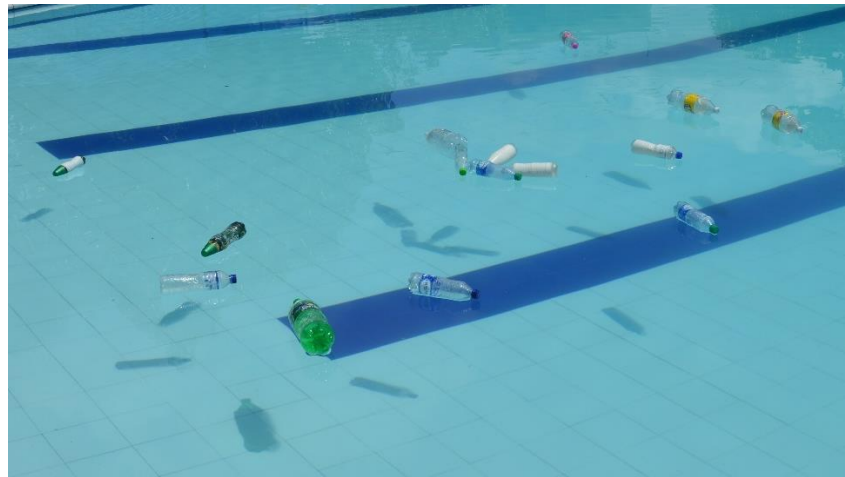
## 6. CAPITULO. ANALISIS DE PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se tratará todo lo relacionado con las pruebas del algoritmo de cooperación en un ambiente real como puede ser un estanque, piscina o lago. También se describirán algunas ventajas y desventajas que presentan los robots y el porqué de éstas.

### 6.1 PRUEBAS

Las pruebas se realizaron en un área de 10 m por 16 m dentro de una piscina y consistían en recolectar objetos que estaban ubicados aleatoriamente en el área como se ve en la figura 154. Para que las pruebas tuviesen éxito, la piscina usada tenía que ser lo suficientemente grande para poder obtener una variación notable en cuanto a las coordenadas geográficas que transmite el módulo GPS (latitud y longitud).

Figura 154. Objetos ubicados aleatoriamente.



Fuente: Propia del autor.

Como el área de trabajo no es muy grande, se decidieron usar solamente dos de los tres robots construidos y de igual forma se puede analizar el funcionamiento del algoritmo de cooperación. El uso de sólo dos robots permite que con el módulo de comunicación XBee del tercero se puedan visualizar los datos transmitidos por cada uno cuando se ejecutan las subtarefas.



Antes de iniciar las pruebas se deben obtener los parámetros de las coordenadas geográficas del área y el ángulo de orientación, de esta forma se ajustan las sentencias que determinan la navegación en la subtask de desplazarse a ayudar. Los datos se obtienen de la brújula digital y el módulo GPS al ejecutarse un algoritmo de lectura, almacenamiento y envío inalámbrico de éstos datos, basado en las sentencias del algoritmo de cooperación expuestas anteriormente. En la tabla 45 se encuentran las coordenadas geográficas del área y en la figura 155 se ve el área usada.

Tabla 45. Coordenadas geográficas del área de las pruebas.

| Punto | Latitud (°) Norte | Longitud (°) Oeste |
|-------|-------------------|--------------------|
| 1     | 4.273866          | 74.825061          |
| 2     | 4.273922          | 74.825170          |
| 3     | 4.274011          | 74.825117          |
| 4     | 4.273969          | 74.825003          |

Fuente: Propia del autor.

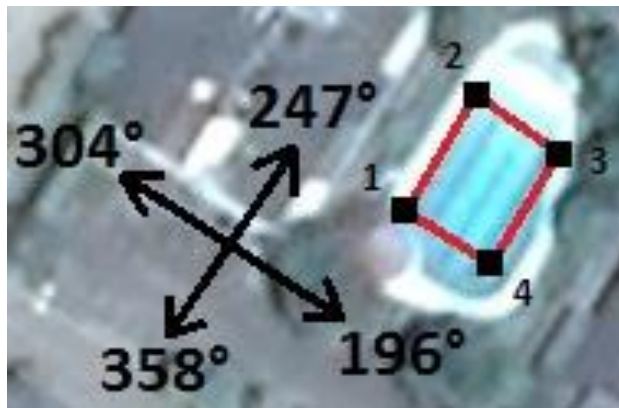
Figura 155. Imagen satelital del área usada en las pruebas.



Fuente: Propia del autor.

Por otro lado, el dato del ángulo de orientación para el área seleccionada se ve en la figura 156.

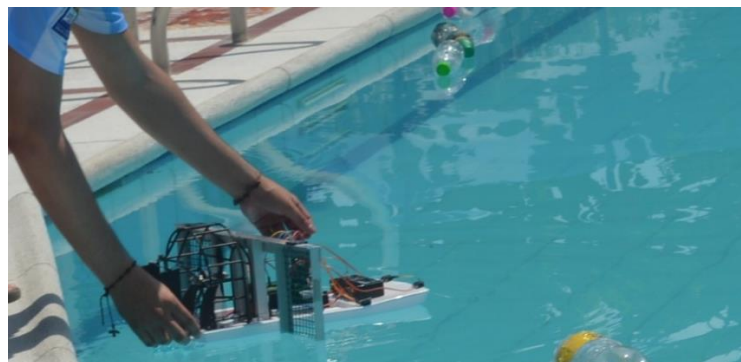
Figura 156. Ángulo de orientación para el área de trabajo.



Fuente: Propia del autor.

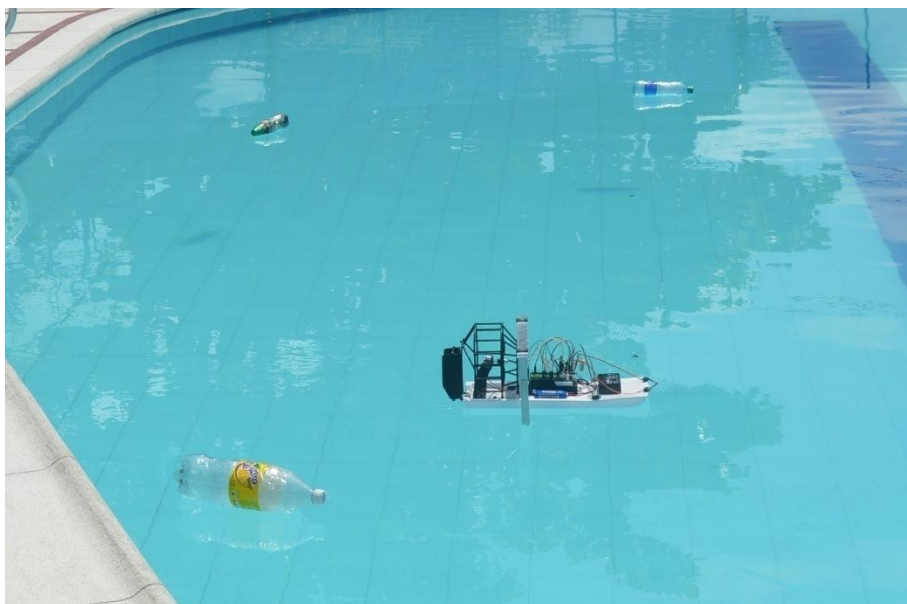
Seguido al ajuste de las sentencias del algoritmo de cooperación, se procedió a hacer las pruebas como se ve en las figuras 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163. A partir de este momento los robots inician la labor de búsqueda de los objetos en el cuerpo de agua, desplazándose por el mismo utilizando los sensores de proximidad para detectar posibles elementos para recoger.

Figura 157. Inicio de pruebas.



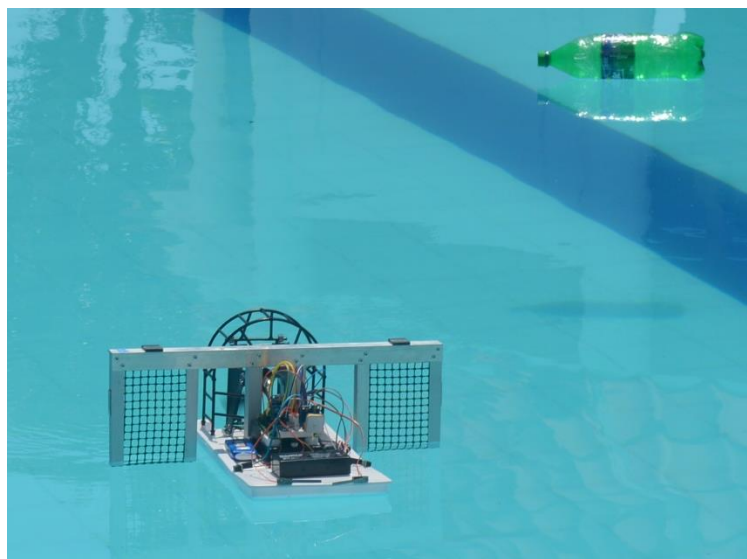
Fuente: Propia del autor.

Figura 158. Robot Ejecutando la subtarea de búsqueda.



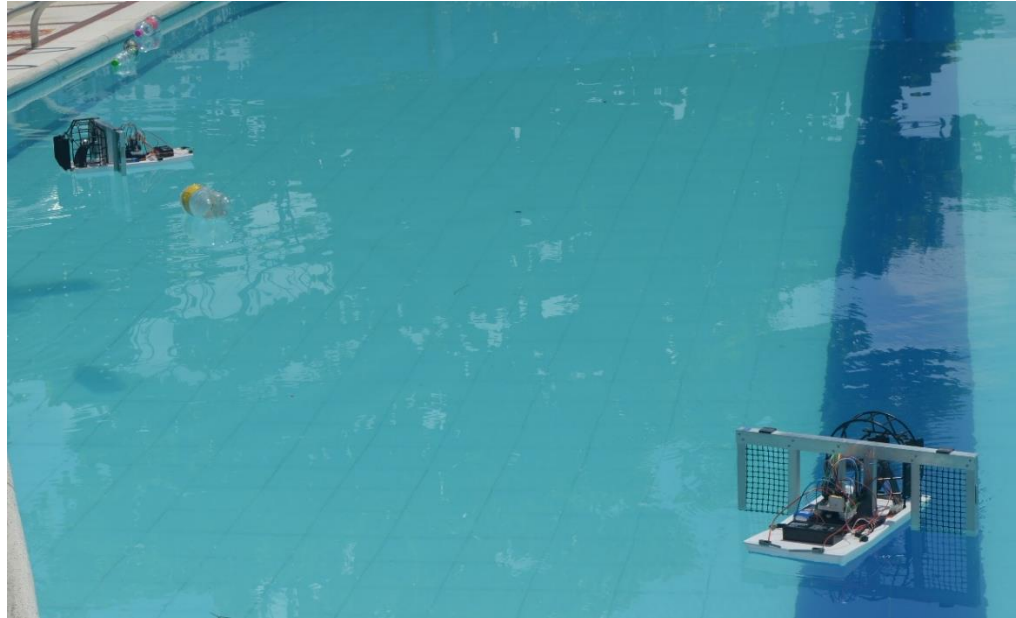
Fuente: Propia del autor.

Figura 159. Robot desplazándose en el área.



Fuente: Propia del autor.

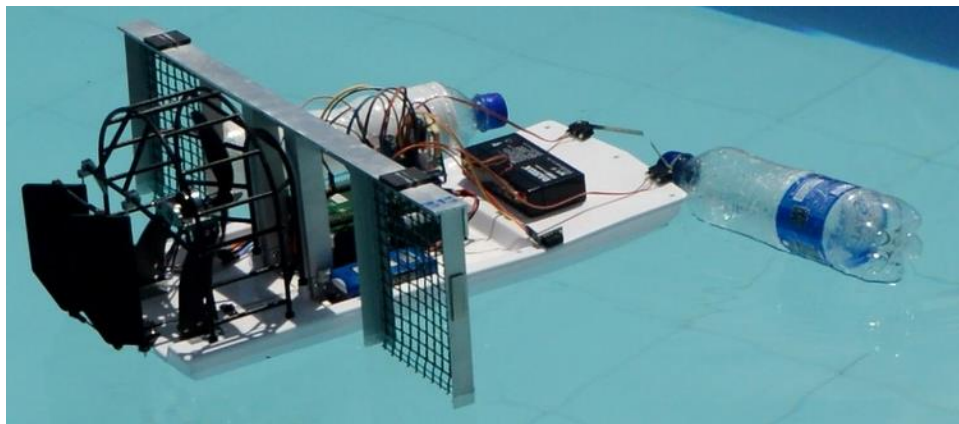
Figura 160. Robots ejecutando la subtask de búsqueda.



Fuente: Propia del autor.

Una vez el robot ha detectado un objeto, envía la señal de ayuda al otro robot, para que éste se acerque a cooperar con el transporte de dicho elemento.

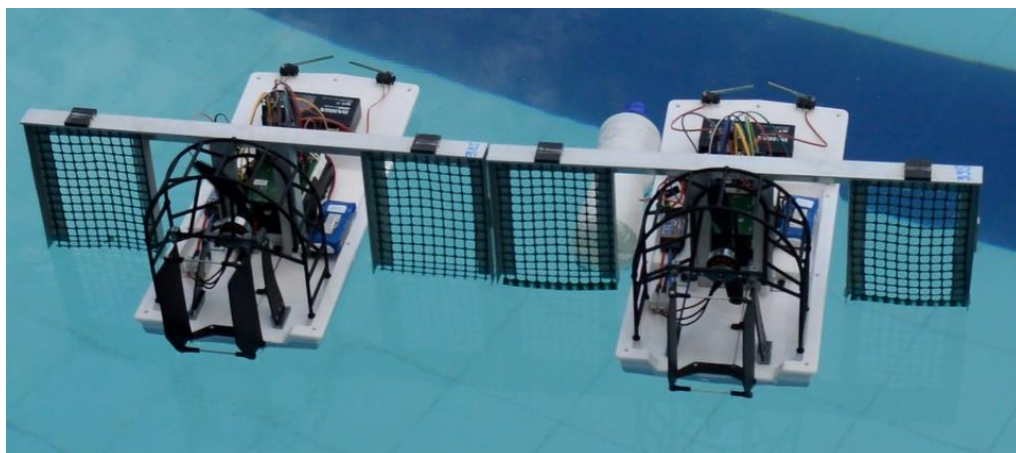
Figura 161. Detección de objeto.



Fuente: Propia del autor.

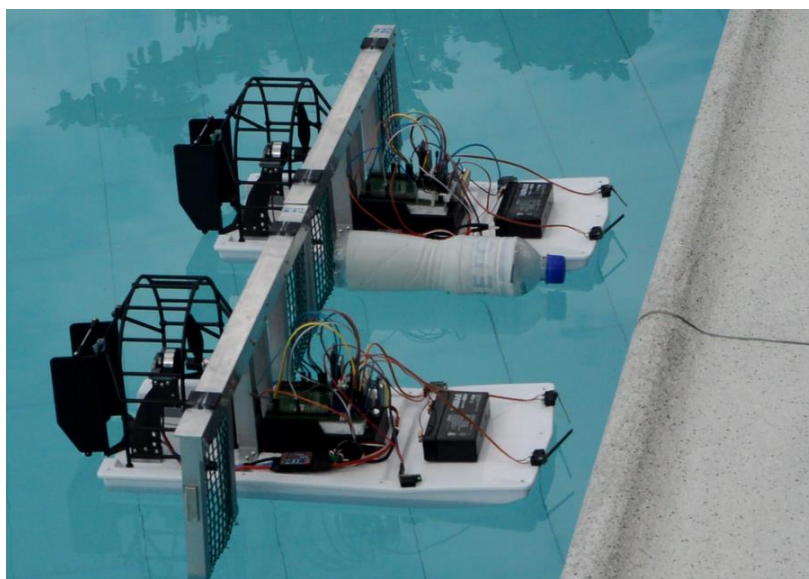
Al acercarse el otro robot, el sistema de imanes cumple la función de acercarlos y emparejarlos para que puedan trasladar el elemento a una zona de recolección donde se dejará el objeto encontrado.

Figura 162. Unión de los robots para el transporte del objeto.



Fuente: Propia del autor.

Figura 163. Fin de la subtask de transporte y del algoritmo de cooperación.



Fuente: Propia del autor.



## 6.1 RESULTADOS

Los resultados de las pruebas con respecto al funcionamiento del algoritmo de cooperación fueron los esperados ya que se logró la recolección de un objeto flotante. Sin embargo, algunos factores del ambiente ocasionaron inconvenientes con el desplazamiento de los robots y la búsqueda de los objetos. Al tener poco peso los objetos y los robots, las corrientes de aire los desplazaban haciendo difícil la ejecución de los movimientos. Por otro lado, la temperatura y los rayos de sol afectaron la operación de los componentes como por ejemplo las baterías, haciendo que se descargaran más rápido de lo que se esperaba.

En la subtarea de búsqueda se observó que algunos objetos chocaban con la malla de arrastre y se distanciaban del sensor infrarrojo encargado de la detección, por lo tanto se decidió disminuir la velocidad del motor brushless y luego de esto los objetos eran arrastrados.

El proyecto no tiene en cuenta los factores del ambiente como la temperatura y las corrientes de aire ya que el objetivo era construir un algoritmo de cooperación funcional. Se recomienda para futuros trabajos de cooperación en robótica móvil acuática mejorar el sistema de navegación, el cuerpo del robot y la malla de arrastre.

Al ser prototipos de robots acuáticos, es recomendable proteger los elementos sensibles al contacto con el agua. Para el proyecto se usó una caja de acrílico transparente de 11.5 cm de ancho, 12.5 cm de largo, 5.7 cm de alto y 2 mm de grosor. Sin embargo, no se pudo integrar ya que el cableado entre los circuitos superaba la medida de alto de la caja, además al haber conexiones entre el motor brushless y el ESC, o el circuito de regulación de voltaje y la batería de plomo ácido, se deben tener orificios que permitan el paso del cableado, lo que puede permitir el paso de agua. El agua que pueda entrar en contacto con los circuitos es poca o quizá mínima ya que la estructura seleccionada no genera salpicaduras al no tener el motor de propulsión bajo el agua.

## **7. CAPITULO. CONCLUSIONES**

Al trabajar en ambientes frágiles como los cuerpos de agua, que tienen zonas poco profundas las cuales contienen organismos de fauna y flora de cuidado, el dispositivo más adecuado para trabajar en ellas es un hidrodeshlizador debido a que no tiene partes bajo del agua que puedan afectar los sistemas que se encuentran allí.

Al tener más unidades realizando una tarea en conjunto, se pueden lograr mejores resultados tanto en tiempo como en ahorro de dinero, con respecto a una tarea que comúnmente la realiza una sola unidad. Cabe aclarar que la cooperación entre robots se da en campos o labores que no requieren de mayor precisión para su objetivo, pues a pesar de optimizar tiempo y dinero, se disminuye la precisión de las acciones, esto claro, dependiendo de los componentes que se usen.

En un ambiente abierto, la luz solar afecta la precisión y funcionamiento de los sensores ópticos, lo cual era de esperarse pues no se realizó un acondicionamiento para este factor externo y el sensor adquirido no tiene filtros para ese tipo de ambiente, aun así, cumplía su labor al detectar un objeto.

El sistema de arrastre diseñado y construido para la recolección de los objetos cumplió su función como se esperaba, al igual que el sistema de imanes colocados para que al acercarse lo suficiente, los robots se juntaran para poder arrastrar el objeto a una zona de recolección.

Se usan dos robots para transportar los objetos recolectados quienes se ayudan mutuamente para no desviarse del camino, en caso de que el peso de los objetos los desvíe, lo cual ocurriría si solamente un robot los transportara. Es decir que cada robot busca apoyarse en el otro para converger en una misma dirección.

## BIBLIOGRAFÍA

A. Valada, P. Velagapudi, B. Kannan, C. Tomaszewski, G. Kantor, and P. Scerri. Development of a Low Cost Multi-Robot Autonomous Marine Surface Platform.

Algoritmos y estructuras de programación. [en línea]. Marzo 20095. [consultado 16 de Octubre de 2015]. p. 1-16. Disponible en: <<http://departamento.us.es/edan/php/asig/LICFIS/LFIPC/Tema5FISPC0809.pdf>>

BETKE, Klaus. The NMEA 0183 Protocol. [en línea]. Mayo 2000. [consultado 2 de Octubre de 2015]. p. 1-28. Disponible en: <<http://www.tronico.fi/OH6NT/docs/NMEA0183.pdf>>

BRÄUNL, Thomas. Embedded Robotics. Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems. 2 ed. Berlin: Springer, 2006, 458 p. ISBN-10 3-540-34318-0.

BROOKS, R.A., 1986. A Robust Layered Control System For a Mobile Robot. IEEE J. Robot. Autom. 2, p. 14–23.

BUENO, Diego. Motor eléctrico brushless: Funcionamiento y características. [en línea]. [consultado 6 de Octubre de 2015]. p. 1-7. Disponible en: <<https://1mecanizadoelarenal.files.wordpress.com/2013/11/motores-brushless.pdf>>

CACCIA, Massimo. Autonomous Surface Craft: prototypes and basic research issues. p. 1.

CADENA, Raúl y MORENO, Jhonattan. Diseño y construcción de una plataforma robótica cooperativa basada en el sistema embebido Primer\_2 para la gestión y manejo de inventarios. [en línea]. 2011. [consultado 27 de Mayo de 2015]. p. 1-120. Disponible en: <<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/3512/2/139279.pdf>>

CAO, Uny; FUKUNAGA, Alex y KAHNG, Andrew. Autonomous Robots. Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. [En línea]. Marzo 1997. Vol. 4 [consultado 4 de Mayo de 2015]. p. 1-23. Disponible en: <<http://metahack.org/cooperative-robots-survey-journal.pdf>>. ISSN 0929-5593.

Contaminación de los ríos, [Internet], [Consultado 10 de mayo de 2015] Disponible en: <<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/20358/1/pfc%20Carlos%20Quesada.pdf>>

CORRALES, J; GARCÍA GÓMEZ, G; TORRES, F y PERDEREAU, V. International Journal of Advanced Robotic Systems. Cooperative Tasks between Humans



andRobots in Industrial Environments. [en línea]. Mayo – Junio 2012. Vol. 9 [consultado 21 de Mayo de 2015]. p. 1-10. Disponible en: <<http://www.isir.upmc.fr/files/2012ACLI2444.pdf>>

CORREA, Daniel y SANABRIA, Fredy. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. Robots de servicios cooperativos. [En línea]. Marzo 2010. Vol. 2 [Consultado 24 de Mayo de 2015]. P. 119-127. Disponible en: <[http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_40/recursos/03\\_v13\\_18/revista\\_16/27102011/18.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/03_v13_18/revista_16/27102011/18.pdf)>. ISSN 1692-7257.

CURCIO Joseph, LEONARD John, and PATRIKALAKIS Andrew. SCOUT — A Low Cost Autonomous SurfacePlatform for Research in Cooperative Autonomy. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. p. 1.

DARWIN, Charles. El origen del hombre. Citado por MARTÍNEZ, Irene y OTEROS, Elisa. Origen y evolución humana. Cooperación vs. Competencia. [en línea]. 2005. [consultado 26 de Enero de 2016]. p. 14. Disponible en: <<http://www.somosbacteriasyvirus.com/cooperacion.pdf>>.

DIGI INTERNATIONAL. XBee/XBee-PRO ZigBee RF Modules User Guide. [en línea]. Marzo 2015. [consultado 7 de Septiembre de 2015]. p. 1-198. Disponible en: <[http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976\\_W.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_W.pdf)>

DUCATELLE, Frederick; DI CARO, Gianni y GAMBARDELLA, Luca. Cooperative Stigmergic Navigation in a Heteroneneous Robotic Swarm. [En línea]. Agosto 2010. Vol. 6226 [consultado 18 de Mayo de 2015]. p. 607-617. Disponible en: <<http://www.swarmanoid.org/upload/pdf/DucDicGam10b.pdf>>. ISSN 0302-9743.

DUCATELLE, Frederick, et al. Swarm Intelligence. Cooperative Navigation in Robotic Swarms [en línea]. [Consultado 2 de Julio de 2015]. p. 1-37. Disponible en: <[http://infoscience.epfl.ch/record/190825/files/dtn\\_navigation-si-web.pdf](http://infoscience.epfl.ch/record/190825/files/dtn_navigation-si-web.pdf)>

ECHARRI, Luis. Contaminación del agua. Universidad de Navarra. 2007.

FAIRCHILD. LM78XX/ LM78XXA 3-Terminal 1 A Positive Voltage Regulator. [en línea]. Septiembre 2014. [consultado 14 de Octubre de 2015]. p. 1-24. Disponible en: <<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM7805.pdf>>

FREESCALE SEMICONDUCTOR. FRDM-K64F Freedom Module User's Guide. [en línea]. Abril 2014. [consultado 25 de Junio de 2015]. p. 1-21. Disponible en: <[http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/user\\_guide/FRDMK64FUG.pdf?fp=1](http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/user_guide/FRDMK64FUG.pdf?fp=1)>

FREESCALE SEMICONDUCTOR. FRDM-KL43Z User's Guide. [en línea]. Julio 2014. [consultado 25 de Junio de 2015]. p. 1-14. Disponible en:

<[http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/user\\_guide/FRDMKL43ZUG.pdf?fsp=1](http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/user_guide/FRDMKL43ZUG.pdf?fsp=1)>.

GIL, Isaac. DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDOBASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SUINTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS. [en línea]. [consultado 13 de Octubre de 2015]. p. 20-31. Disponible en: <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4740/fichero/2.+Baterias+y+Supercondensadores.pdf>>

Gordon Miriam, Ruth Zamist, MUNICIPAL BEST MANAGEMENT PRACTICES FOR CONTROLLING TRASH AND DEBRIS IN STOMRWATER AND URBAN RUNOFF, p, 10.

GREENPEACE. LA PESCA DE ARRASTRE, [www.greenpeace.org/espana/Global/espana/.../Qué\\_es\\_pesca\\_arrastre.pdf](http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/.../Qué_es_pesca_arrastre.pdf) p. 1.

HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L. [en línea]. Febrero 2013. [consultado 6 de Octubre de 2015]. p. 1-20. Disponible en: <[http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense\\_Brochures-documents/HMC5883L\\_3-Axis\\_Digital\\_Compass\\_IC.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf)>

INGENIERÍA MCI LTDA. ¿QUÉ ES XBEE?. [en línea]. [consultado 22 de Septiembre de 2015].Disponible en: <<http://xbee.cl/que-es-xbee/>>.

KUBE, Ronald y BONABEAU, Eric. Robotics and Autonomous Systems. Cooperative transport by ants and robots. [en línea]. Enero 2000. Vol. 30 [consultado 26 de Mayo de 2015]. p. 85-101. Disponible en: <<http://webdocs.cs.ualberta.ca/~kuba/papers/KubeBonabeauRAS2000.pdf>>

LI Zhi, BACHMAYER Ralf. The Development of a Robust Autonomous Surface Craft for Deployment in Harsh. Ocean Environment. p. 1.

MANLEY, Justin E. Development of the autonomous surface craft “ACES”. Department of Ocean Engineering. 1997. p. 828.

MANLEY J, MARSH A, CONFORTH W, and WISEMAN J. Evolution of theAutonomous Surface Craft AutoCat. Citado por Zhi Li, Ralf Bachmayer. The Development of a Robust Autonomous Surface Craft for Deployment in Harsh. p. 1.

MARTÍNEZ, Irene y OTEROS, Elisa. Origen y evolución humana. Cooperación vs. Competencia. [en línea]. 2005. [consultado 26 de Enero de 2016]. p. 1-17. Disponible en: <<http://www.somosbacteriasyvirus.com/cooperacion.pdf>>.

MICROCHIP. dsPIC33FJ32MC302/304, dsPIC33FJ64MCX02/X04 and dsPIC33FJ128MCX02/X04 Data Sheet. [en línea]. 2007-2011. [consultado 23 de Junio de 2015]. p. 1-436. Disponible en: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70291F.pdf>>.

MICROCHIP. PIC24HJ32GP302/304, PIC24HJ64GPX02/X04 and PIC24HJ128GPX02/X04 Data Sheet. [en línea]. 2009. [consultado 23 de Junio de 2015]. p. 1-356. Disponible en: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70293D.pdf>>.

MICROCHIP. PIC32MX3XX/4XX Data Sheet. [en línea]. 2011. [consultado 23 de Junio de 2015]. p. 1-214. Disponible en: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/61143H.pdf>>.

MOLINA, Manuel y RODRÍGUEZ, Edgar. Flotilla de Robots Para Trabajos en Robótica Cooperativa. [En línea]. Mayo 2014 [Consultado 24 de Mayo de 2015], Disponible en: <<http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/12129/1/FLOTILLA%20DE%20ROBOTS%20PARA%20TRABAJOS%20EN%20ROBOTICA%20COOPERATIVA.pdf>>

OKTAR, Adnan. EL CARIÑO ENTRE LOS ANIMALES REVELA LA OBRA DE DIOS. A9 GROUP. 175 p.

Paul Scerri, Prasanna Velagapudi, Balajee Kannan, Abhinav Valada, Christopher Tomaszewski, John Dolan, Adrian Scerri, Kumar Shaurya Shankar, Luis Bill and George Kantor. Real-World Testing of a Multi-Robot Team.

POZO, Ana. Sistemas Electrónicos de Potencia. [en línea]. Marzo 2013 [consultado 9 de Junio de 2015]. Disponible en: <[http://ocw.uma.es/ingenierias/sistemas-electronicos-de-potencia/skinless\\_view](http://ocw.uma.es/ingenierias/sistemas-electronicos-de-potencia/skinless_view)>

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Sensor. [en línea]. [consultado 9 de Junio de 2015]. Disponible en: <<http://lema.rae.es/drae/srv/search?val=sensor&submit.x=42&submit.y=6>>

REY, Jorge. El Sistema de Posicionamiento Global - GPS. [en línea]. Mayo 2006. [consultado 5 de Junio de 2015]. p. 1-7. Disponible en: <<http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/IN/IN65700.pdf>>

RODRIGUEZ Claudia. Automated Bathymetry Mapping Using an Autonomous Surface Craft. S.B. Ocean Engineering. 1996. p. 21.

SCERRI, Paul; VELAGAPUDI, Prasanna; KANNAN, Balajee; VALADA, Abhinav; TOMASZEWSKI, Christopher; DOLAN, John; SCERRI, Adrian; SHAURYA, Kumar; BILL, Luis y KANTOR, George. Real-World Testing of a Multi-Robot Team. [En línea]. [Consultado el 1 de Julio de 2015] Disponible en: <<http://repository.cmu.edu/robotics/905/>>

SENSORES. [en línea]. [consultado 27 de Septiembre de 2015]. p. 1-21. Disponible en: <<http://www.isa.cie.uva.es/~maria/sensores.pdf>>

SENSORES PARA ROBOTS MOVILES. [en línea]. [consultado 30 de Septiembre de 2015]. p. 4-44. Disponible en: <<http://www.iit.upcomillas.es/alvaro/teaching/Clases/Robots/teoria/Sensores%20y%20actuadores.pdf>>

SHARP. GP2Y0D815Z0F. [en línea]. [consultado 29 de Septiembre de 2015]. p. 1-8. Disponible en: <[http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0d815z\\_e.pdf](http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0d815z_e.pdf)>

SORIA, Carlos; CARELLI, Ricardo; KELLY, Rafael e IBARRA, Juan. Control de Robots Cooperativos Por Medio de Visión Artificial. [En línea]. [Consultado 23 Mayo de 2015] Disponible en: <[http://www.inaut.unsj.edu.ar/Files/Ca1661\\_04.pdf](http://www.inaut.unsj.edu.ar/Files/Ca1661_04.pdf)>

STMICROELECTRONICS. STM32F4DISCOVERY. [en línea]. Septiembre 2014. [consultado 24 de Junio de 2015]. p. 1-4. Disponible en: <[http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data\\_brief/DM00037955.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00037955.pdf)>.

STMICROELECTRONICS. STM32F3DISCOVERY. [en línea]. Octubre 2014. [consultado 24 de Junio de 2015]. p. 1-3. Disponible en: <[http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data\\_brief/DM00063389.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00063389.pdf)>.

STMICROELECTRONICS. UM1467 User Manual. Getting started with software and firmware environments for the STM32F4DISCOVERY Kit. [en línea]. Septiembre 2011. [consultado 24 de Septiembre de 2015]. p. 1-46. Disponible en: <[http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user\\_manual/DM00037368.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00037368.pdf)>.

TEXAS INSTRUMENTS. MSP-EXP432P401R LaunchPad™ Evaluation Kit. [en línea]. Marzo 2015. [consultado 22 de Junio de 2015]. p. 1-39. Disponible en: <<http://www.ti.com/lit/ug/slau597/slau597.pdf>>.

TEXAS INSTRUMENTS. MSP-EXP430F5529LP LaunchPad™ Development Kit. [en línea]. Septiembre 2013. [consultado 22 de Junio de 2015]. p. 1-61. Disponible en: <<http://www.ti.com/lit/ug/slau533b/slau533b.pdf>>.

u-blox. NEO-6, u-blox 6 GPS Modules Data Sheet. [en línea]. 2011. [consultado 2 de Octubre de 2015]. p. 1-25. Disponible en: <[https://www.openimpulse.com/blog/wp-content/uploads/wpsc/downloadables/GY-NEO6MV2-GPS-Module-Datasheet.pdf](https://www.openimpulse.com/blog/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wpsc/downloadables/GY-NEO6MV2-GPS-Module-Datasheet.pdf)>

u-blox. u-center GPS evaluation software for PCs. [en línea]. 2009. [consultado 2 de Octubre de 2015]. p. 1. Disponible en: <[http://www.amtechs.co.jp/2\\_gps/pdf/u-center.pdf](http://www.amtechs.co.jp/2_gps/pdf/u-center.pdf)>

VALADA, Abhinav; VELAGAPUDI, Prasanna; KANNAN, Balajee; TOMASZEWSKI, Christopher; KANTOR, George y SCERRI, Paul. Development of a Low Cost Multi-Robot Autonomous Marine Surface Platform- [En línea]. [Consultado el 28 de Junio de 2015] Disponible en: <[https://www.ri.cmu.edu/publication\\_view.html?pub\\_id=7069](https://www.ri.cmu.edu/publication_view.html?pub_id=7069)>

ANEXOS

Anexo A. Informe de simulación estructura recolectora.

Descripción  
Estructura Recolectora de Objetos

Simulación de Estructura viga final

Fecha: domingo, 18 de octubre de 2015  
Diseñador: Andres Santos, William Avila  
Nombre de estudio: SimulationXpress Study  
Tipo de análisis: Análisis estático

Table of Contents

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Descripción .....             | 1 |
| Suposiciones.....             | 2 |
| Información de modelo.....    | 2 |
| Propiedades de material ..... | 2 |
| Cargas y sujeciones .....     | 3 |
| Información de malla .....    | 4 |
| Resultados del estudio .....  | 5 |
| Conclusión .....              | 5 |

## Suposiciones

## Información de modelo

| Nombre del modelo: Estructura viga final<br>Configuración actual: Predeterminado |              |                                                                                                             |                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sólidos</b>                                                                   |              |                                                                                                             |                                                                                |
| Nombre de documento y referencia                                                 | Tratado como | Propiedades volumétricas                                                                                    | Ruta al documento/Fecha de modificación                                        |
| Saliente-Extruir14                                                               | Sólido       | Masa:0.309417 kg<br>Volumen:0.000114599 m <sup>3</sup><br>Densidad:2700 kg/m <sup>3</sup><br>Peso:3.03228 N | D:\TESIS<br>ESTRUCTURA\Estructura<br>viga final.SLDPRT<br>Oct 17 12:22:20 2015 |

## Propiedades de material

| Referencia de modelo | Propiedades                                                                                                                                                                                                                                              | Componentes                                         |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                      | <p>Nombre: Aleación 1060</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión máxima de von Mises</p> <p>Límite elástico: 27.5742 N/mm<sup>2</sup></p> <p>Límite de tracción: 68.9356 N/mm<sup>2</sup></p> | Sólido 1(Saliente-Extruir14)(Estructura viga final) |



SOLIDWORKS

Realizado con SolidWorks Simulation

Simulación de Estructura viga final

2

### Cargas y sujeciones

| Nombre de sujeción | Imagen de sujeción | Detalles de sujeción                         |
|--------------------|--------------------|----------------------------------------------|
| Fijo-3             |                    | Entidades: 2 cara(s)<br>Tipo: Geometría fija |

| Nombre de carga | Cargar imagen | Detalles de carga                                                    |
|-----------------|---------------|----------------------------------------------------------------------|
| Fuerza-3        |               | Entidades: 4 cara(s)<br>Tipo: Aplicar fuerza normal<br>Valor: 3.05 N |



SOLIDWORKS

Analizado con SolidWorks Simulation

Simulación de Estructura viga final

3



### Información de malla

|                                      |                                     |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Tipo de malla                        | Malla sólida                        |
| Mallador utilizado:                  | Malla estándar                      |
| Transición automática:               | Desactivar                          |
| Incluir bucles automáticos de malla: | Desactivar                          |
| Puntos jacobianos                    | 4 Puntos                            |
| Tamaño de elementos                  | 7.18506 mm                          |
| Tolerancia                           | 0.359253 mm                         |
| Calidad de malla                     | Elementos cuadráticos de alto orden |

### Información de malla - Detalles

|                                                 |          |
|-------------------------------------------------|----------|
| Número total de nodos                           | 16474    |
| Número total de elementos                       | 7766     |
| Cociente máximo de aspecto                      | 20.316   |
| % de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3  | 27.3     |
| % de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10 | 0.67     |
| % de elementos distorsionados (Jacobiana)       | 0        |
| Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):      | 00:00:03 |
| Nombre de computadora:                          | X450C-PC |

## Resultados del estudio

| Nombre                                                        | Tipo                      | Mín.                                                  | Máx.                                              |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Stress                                                        | VON: Tensión de von Mises | 2.52974e-005 N/mm <sup>2</sup><br>(MPa)<br>Nodo: 7097 | 7.59053 N/mm <sup>2</sup><br>(MPa)<br>Nodo: 16234 |
| Estructura viga final-SimulationXpress Study-Tensiones-Stress |                           |                                                       |                                                   |

| Nombre                                                                    | Tipo                            | Mín.              | Máx.                      |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------|
| Displacement                                                              | URES: Desplazamiento resultante | 0 mm<br>Nodo: 885 | 0.973953 mm<br>Nodo: 2448 |
| Estructura viga final-SimulationXpress Study-Desplazamientos-Displacement |                                 |                   |                           |

| Nombre                                                                   | Tipo            |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Deformation                                                              | Forma deformada |
| Estructura viga final-SimulationXpress Study-Desplazamientos-Deformation |                 |

| Nombre                                                                            | Tipo                      | Mín.                   | Máx.                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| Factor of Safety                                                                  | Tensión de von Mises máx. | 3.63271<br>Nodo: 16234 | 1.09e+006<br>Nodo: 7097 |
| Estructura viga final-SimulationXpress Study-Factor de seguridad-Factor of Safety |                           |                        |                         |

## Conclusión

Optima para construcción



SOLIDWORKS

Desarrollado con SolidWorks Simulation

Simulación de Estructura viga final

5



## STM32F4DISCOVERY

Discovery kit for STM32F407/417 line

Data brief

### Features

- STM32F407VGT6 microcontroller featuring 32-bit ARM Cortex-M4F core, 1 MB Flash, 192 KB RAM in an LQFP100 package
- On-board ST-LINK/V2 with selection mode switch to use the kit as a standalone ST-LINK/V2 (with SWD connector for programming and debugging)
- Board power supply: through USB bus or from an external 5 V supply voltage
- External application power supply: 3 V and 5 V
- LIS302DL or LIS3DSH ST MEMS 3-axis accelerometer
- MP45DT02, ST MEMS audio sensor, omni-directional digital microphone
- CS43L22, audio DAC with integrated class D speaker driver
- Eight LEDs:
  - LD1 (red/green) for USB communication
  - LD2 (red) for 3.3 V power on
  - Four user LEDs, LD3 (orange), LD4 (green), LD5 (red) and LD6 (blue)
  - 2 USB OTG LEDs LD7 (green) VBus and LD8 (red) over-current
- Two push buttons (user and reset)
- USB OTG FS with micro-AB connector
- Extension header for all LQFP100 I/Os for quick connection to prototyping board and easy probing

### Description

The STM32F4DISCOVERY helps you to discover the STM32F407/417 line features and to develop your applications easily. It includes everything required for beginners and experienced users to get started quickly.



Based on the STM32F407VGT6, it includes an ST-LINK/V2 embedded debug tool, two ST MEMS, digital accelerometer and digital microphone, one audio DAC with integrated class D speaker driver, LEDs and push buttons and an USB OTG micro-AB connector.

A large number of free ready-to-run application firmware examples are available on [www.st.com/stm32f4-discovery](http://www.st.com/stm32f4-discovery) to support quick evaluation and development.

To expand the functionality of the STM32F4 Discovery kit with Ethernet connectivity, LCD display and more, visit [www.st.com/stm32f4dis-expansion](http://www.st.com/stm32f4dis-expansion).

## 1 Ordering information

To order the STM32F407/417 line discovery board, use the order code STM32F4DISCOVERY.

## 2 System requirements

- Windows PC (2000, XP, Vista, 7)
- USB type A to Mini-B cable

## 3 Development toolchains

- Atium TASKING™ VX-Toolset
- Atollic TrueSTUDIO®
- IAR, Embedded Workbench® for ARM
- Keil, MDK-ARM™

## 4 Demonstration software

The demonstration software is preloaded in the board's Flash memory. It uses the MEMS motion sensor to blink the four LEDs according to the motion direction and speed. Connecting the board to a PC with a second USB 'type A to micro-B' cable converts it into a standard mouse, and board motion controls the PC cursor.

The latest versions of the demonstration source code and associated documentation can be downloaded from [www.st.com/stm32f4-discovery](http://www.st.com/stm32f4-discovery).

## 5 Revision history

Table 1. Document revision history

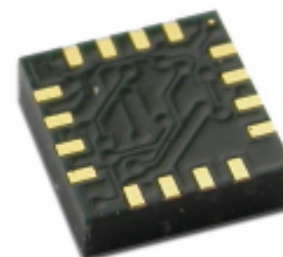
| Date        | Revision | Changes                                                                |
|-------------|----------|------------------------------------------------------------------------|
| 15-Sep-2011 | 1        | Initial version.                                                       |
| 28-Jan-2013 | 2        | Added URL for expanding functionality in <a href="#">Description</a> . |
| 15-Jul-2013 | 3        | Modified to apply to STM32F407/417. Added LIS3DSH accelerometer.       |

## 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L

**Honeywell**

*Advanced Information*

The Honeywell HMC5883L is a surface-mount, multi-chip module designed for low-field magnetic sensing with a digital interface for applications such as low-cost compassing and magnetometry. The HMC5883L includes our state-of-the-art, high-resolution HMC118X series magneto-resistive sensors plus an ASIC containing amplification, automatic degaussing strap drivers, offset cancellation, and a 12-bit ADC that enables 1° to 2° compass heading accuracy. The I<sup>2</sup>C serial bus allows for easy interface. The HMC5883L is a 3.0x3.0x0.9mm surface mount 16-pin leadless chip carrier (LCC). Applications for the HMC5883L include Mobile Phones, Netbooks, Consumer Electronics, Auto Navigation Systems, and Personal Navigation Devices.



The HMC5883L utilizes Honeywell's Anisotropic Magnetoresistive (AMR) technology that provides advantages over other magnetic sensor technologies. These anisotropic, directional sensors feature precision in-axis sensitivity and linearity. These sensors' solid-state construction with very low cross-axis sensitivity is designed to measure both the direction and the magnitude of Earth's magnetic fields, from milli-gauss to 8 gauss. Honeywell's Magnetic Sensors are among the most sensitive and reliable low-field sensors in the industry.

### FEATURES

- ▶ 3-Axis Magnetoresistive Sensors and ASIC in a 3.0x3.0x0.9mm LCC Surface Mount Package
- ▶ 12-Bit ADC Coupled with Low Noise AMR Sensors Achieves 2 milli-gauss Field Resolution in  $\pm 8$  Gauss Fields
- ▶ Built-In Self Test
- ▶ Low Voltage Operations (2.16 to 3.6V) and Low Power Consumption (100  $\mu$ A)
- ▶ Built-In Strap Drive Circuits
- ▶ I<sup>2</sup>C Digital Interface
- ▶ Lead Free Package Construction
- ▶ Wide Magnetic Field Range ( $\pm 8$  Oe)
- ▶ Software and Algorithm Support Available
- ▶ Fast 160 Hz Maximum Output Rate

### BENEFITS

- ▶ Small Size for Highly Integrated Products. Just Add a Micro-Controller Interface, Plus Two External SMT Capacitors Designed for High Volume, Cost Sensitive OEM Designs Easy to Assemble & Compatible with High Speed SMT Assembly
- ▶ Enables 1° to 2° Degree Compass Heading Accuracy
- ▶ Enables Low-Cost Functionality Test after Assembly in Production
- ▶ Compatible for Battery Powered Applications
- ▶ Set/Reset and Offset Strap Drivers for Degaussing, Self Test, and Offset Compensation
- ▶ Popular Two-Wire Serial Data Interface for Consumer Electronics
- ▶ RoHS Compliance
- ▶ Sensors Can Be Used in Strong Magnetic Field Environments with a 1° to 2° Degree Compass Heading Accuracy
- ▶ Compassing Heading, Hard Iron, Soft Iron, and Auto Calibration Libraries Available
- ▶ Enables Pedestrian Navigation and LBS Applications



## HMC5883L

### SPECIFICATIONS (\* Tested at 25°C except stated otherwise.)

| Characteristics                   | Conditions*                                                                                                                                            | Min          | Typ        | Max            | Units          |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------|----------------|----------------|
| <b>Power Supply</b>               |                                                                                                                                                        |              |            |                |                |
| Supply Voltage                    | VDD Referenced to AGND<br>VDDIO Referenced to DGND                                                                                                     | 2.16<br>1.71 | 2.5<br>1.8 | 3.6<br>VDD+0.1 | Volts<br>Volts |
| Average Current Draw              | Idle Mode                                                                                                                                              | -            | 2          | -              | μA             |
|                                   | Measurement Mode (7.5 Hz ODR;<br>No measurement average, MA1:MA0 = 00)<br>VDD = 2.5V, VDDIO = 1.8V (Dual Supply)<br>VDD = VDDIO = 2.5V (Single Supply) | -            | 100        | -              | μA             |
| <b>Performance</b>                |                                                                                                                                                        |              |            |                |                |
| Field Range                       | Full scale (FS)                                                                                                                                        | -8           |            | +8             | gauss          |
| Mag Dynamic Range                 | 3-bit gain control                                                                                                                                     | ±1           |            | ±8             | gauss          |
| Sensitivity (Gain)                | VDD=3.0V, GN=0 to 7, 12-bit ADC                                                                                                                        | 230          |            | 1370           | LSb/gauss      |
| Digital Resolution                | VDD=3.0V, GN=0 to 7, 1-LSb, 12-bit ADC                                                                                                                 | 0.73         |            | 4.35           | milli-gauss    |
| Noise Floor<br>(Field Resolution) | VDD=3.0V, GN=0, No measurement<br>average, Standard Deviation 100 samples<br>(See typical performance graphs below)                                    |              | 2          |                | milli-gauss    |
| Linearity                         | ±2.0 gauss input range                                                                                                                                 |              |            | 0.1            | ±% FS          |
| Hysteresis                        | ±2.0 gauss input range                                                                                                                                 |              | ±25        |                | ppm            |
| Cross-Axis Sensitivity            | Test Conditions: Cross field = 0.5 gauss,<br>Happlied = ±3 gauss                                                                                       |              | ±0.2%      |                | %FS/gauss      |
| Output Rate (ODR)                 | Continuous Measurement Mode                                                                                                                            | 0.75         |            | 75             | Hz             |
|                                   | Single Measurement Mode                                                                                                                                |              |            | 160            | Hz             |
| Measurement Period                | From receiving command to data ready                                                                                                                   |              | 6          |                | ms             |
| Turn-on Time                      | Ready for I2C commands                                                                                                                                 |              | 200        |                | μs             |
|                                   | Analog Circuit Ready for Measurements                                                                                                                  |              | 50         |                | ms             |
| Gain Tolerance                    | All gain/dynamic range settings                                                                                                                        |              | ±5         |                | %              |
| I <sup>2</sup> C Address          | 8-bit read address                                                                                                                                     |              | 0x3D       |                | hex            |
|                                   | 8-bit write address                                                                                                                                    |              | 0x3C       |                | hex            |
| I <sup>2</sup> C Rate             | Controlled by I <sup>2</sup> C Master                                                                                                                  |              |            | 400            | kHz            |
| I <sup>2</sup> C Hysteresis       | Hysteresis of Schmitt trigger inputs on SCL<br>and SDA - Fall (VDDIO=1.8V)                                                                             |              | 0.2*VDDIO  |                | Volts          |
|                                   | Rise (VDDIO=1.8V)                                                                                                                                      |              | 0.8*VDDIO  |                | Volts          |
| Self Test                         | X & Y Axes                                                                                                                                             |              | ±1.16      |                | gauss          |
|                                   | Z Axis                                                                                                                                                 |              | ±1.08      |                | gauss          |
|                                   | X & Y & Z Axes (GN=5) Positive Bias<br>X & Y & Z Axes (GN=5) Negative Bias                                                                             | 243<br>-575  |            | 575<br>-243    | LSb            |
| Sensitivity Tempco                | T <sub>A</sub> = -40 to 125°C, Uncompensated Output                                                                                                    |              | -0.3       |                | %/°C           |
| <b>General</b>                    |                                                                                                                                                        |              |            |                |                |
| ESD Voltage                       | Human Body Model (all pins)                                                                                                                            |              |            | 2000           | Volts          |
|                                   | Charged Device Model (all pins)                                                                                                                        |              |            | 750            | Volts          |
| Operating Temperature             | Ambient                                                                                                                                                | -30          |            | 85             | °C             |
| Storage Temperature               | Ambient, unbiased                                                                                                                                      | -40          |            | 125            | °C             |

## HMC5883L

| Characteristics       | Conditions*                    | Min  | Typ  | Max  | Units |
|-----------------------|--------------------------------|------|------|------|-------|
| Reflow Classification | MSL 3, 260 °C Peak Temperature |      |      |      |       |
| Package Size          | Length and Width               | 2.85 | 3.00 | 3.15 | mm    |
| Package Height        |                                | 0.8  | 0.9  | 1.0  | mm    |
| Package Weight        |                                |      | 18   |      | mg    |

### Absolute Maximum Ratings (\* Tested at 25°C except stated otherwise.)

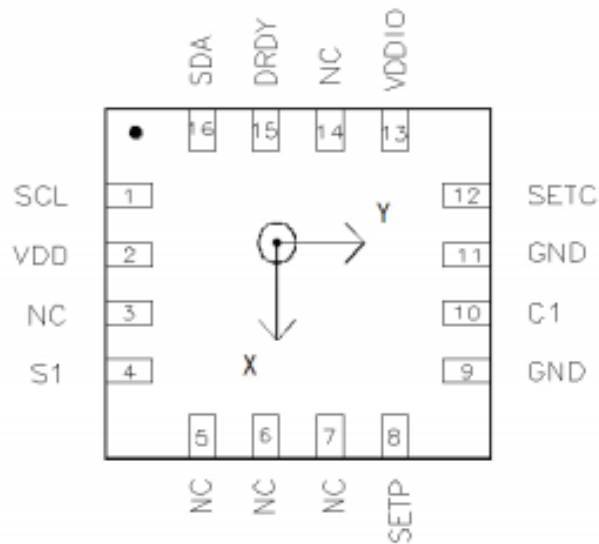
| Characteristics      | Min  | Max | Units |
|----------------------|------|-----|-------|
| Supply Voltage VDD   | -0.3 | 4.8 | Volts |
| Supply Voltage VDDIO | -0.3 | 4.8 | Volts |

### PIN CONFIGURATIONS

| Pin | Name  | Description                                                                                                                                |
|-----|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | SCL   | Serial Clock – I <sup>2</sup> C Master/Slave Clock                                                                                         |
| 2   | VDD   | Power Supply (2.16V to 3.6V)                                                                                                               |
| 3   | NC    | Not to be Connected                                                                                                                        |
| 4   | S1    | Tie to VDDIO                                                                                                                               |
| 5   | NC    | Not to be Connected                                                                                                                        |
| 6   | NC    | Not to be Connected                                                                                                                        |
| 7   | NC    | Not to be Connected                                                                                                                        |
| 8   | SETP  | Set/Reset Strap Positive – S/R Capacitor (C2) Connection                                                                                   |
| 9   | GND   | Supply Ground                                                                                                                              |
| 10  | C1    | Reservoir Capacitor (C1) Connection                                                                                                        |
| 11  | GND   | Supply Ground                                                                                                                              |
| 12  | SETC  | S/R Capacitor (C2) Connection – Driver Side                                                                                                |
| 13  | VDDIO | IO Power Supply (1.71V to VDD)                                                                                                             |
| 14  | NC    | Not to be Connected                                                                                                                        |
| 15  | DRDY  | Data Ready, Interrupt Pin. Internally pulled high. Optional connection. Low for 250 µsec when data is placed in the data output registers. |
| 16  | SDA   | Serial Data – I <sup>2</sup> C Master/Slave Data                                                                                           |

Table 1: Pin Configurations

## HMC5883L

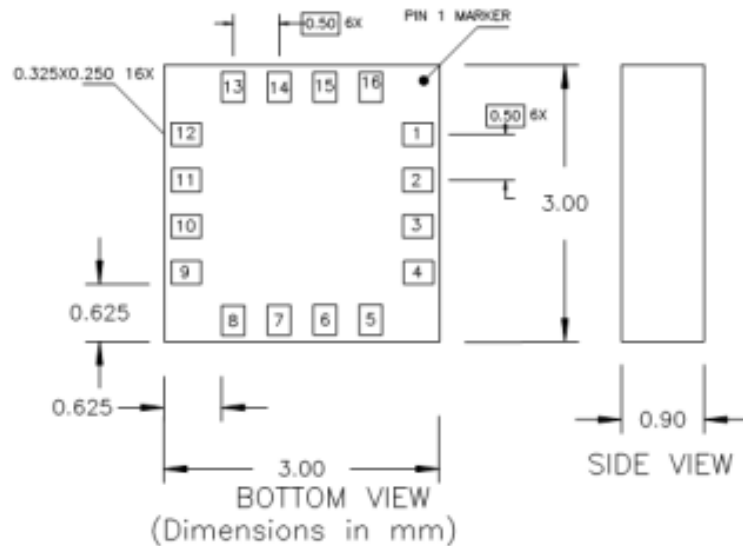


TOP VIEW (looking through)

Arrow indicates direction of magnetic field that generates a positive output reading in Normal Measurement configuration.

## PACKAGE OUTLINES

PACKAGE DRAWING HMC5883L (16-PIN LPCC, dimensions in millimeters)

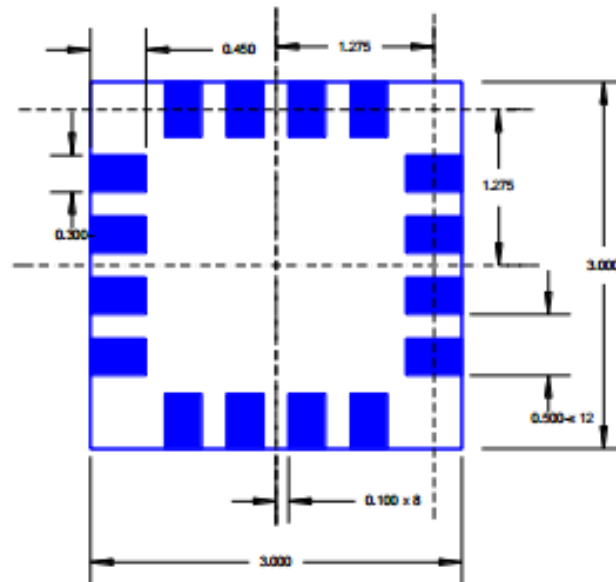


## MOUNTING CONSIDERATIONS

The following is the recommend printed circuit board (PCB) footprint for the HMC5883L.



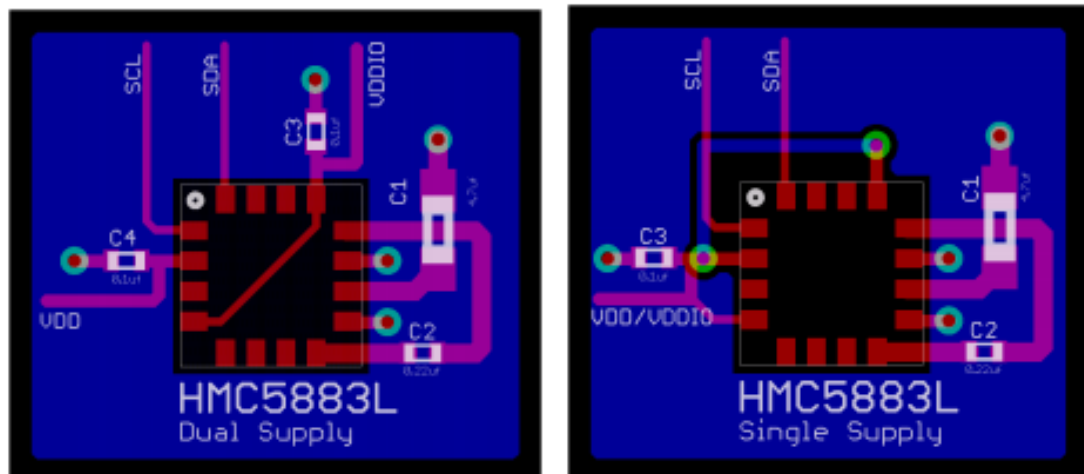
## HMC5883L



HMC5883 Land Pad Pattern  
(All dimensions are in mm)

## LAYOUT CONSIDERATIONS

Besides keeping all components that may contain ferrous materials (nickel, etc.) away from the sensor on both sides of the PCB, it is also recommended that there is no conducting copper under/near the sensor in any of the PCB layers. See recommended layout below. Notice that the one trace under the sensor in the dual supply mode is not expected to carry active current since it is for pin 4 pull-up to VDDIO. Power and ground planes are removed under the sensor to minimize possible source of magnetic noise. For best results, use non-ferrous materials for all exposed copper coding.



## HMC5883L

### PCB Pad Definition and Traces

The HMC5883L is a fine pitch LCC package. Refer to previous figure for recommended PCB footprint for proper package centering. Size the traces between the HMC5883L and the external capacitors (C1 and C2) to handle the 1 ampere peak current pulses with low voltage drop on the traces.

### Stencil Design and Solder Paste

A 4 mil stencil and 100% paste coverage is recommended for the electrical contact pads.

### Reflow Assembly

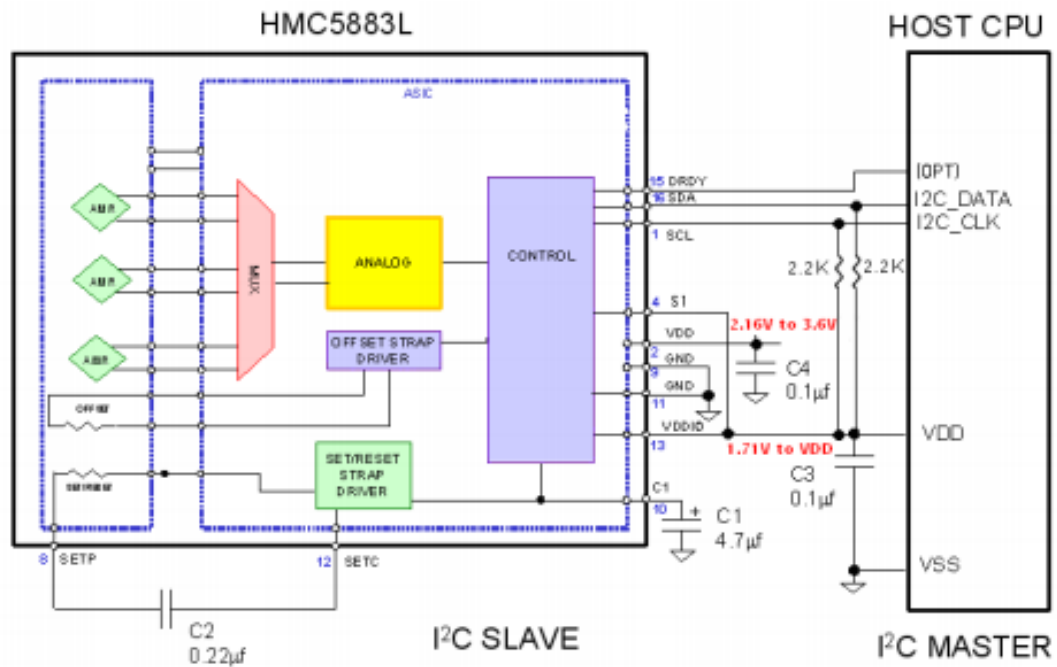
This device is classified as MSL 3 with 260°C peak reflow temperature. A baking process (125°C, 24 hrs) is required if device is not kept continuously in a dry (< 10% RH) environment before assembly. No special reflow profile is required for HMC5883L, which is compatible with lead eutectic and lead-free solder paste reflow profiles. Honeywell recommends adherence to solder paste manufacturer's guidelines. Hand soldering is not recommended. Built-in self test can be used to verify device functionalities after assembly.

### External Capacitors

The two external capacitors should be ceramic type construction with low ESR characteristics. The exact ESR values are not critical but values less than 200 milli-ohms are recommended. Reservoir capacitor C1 is nominally 4.7  $\mu\text{F}$  in capacitance, with the set/reset capacitor C2 nominally 0.22  $\mu\text{F}$  in capacitance. Low ESR characteristics may not be in many small SMT ceramic capacitors (0402), so be prepared to up-size the capacitors to gain Low ESR characteristics.

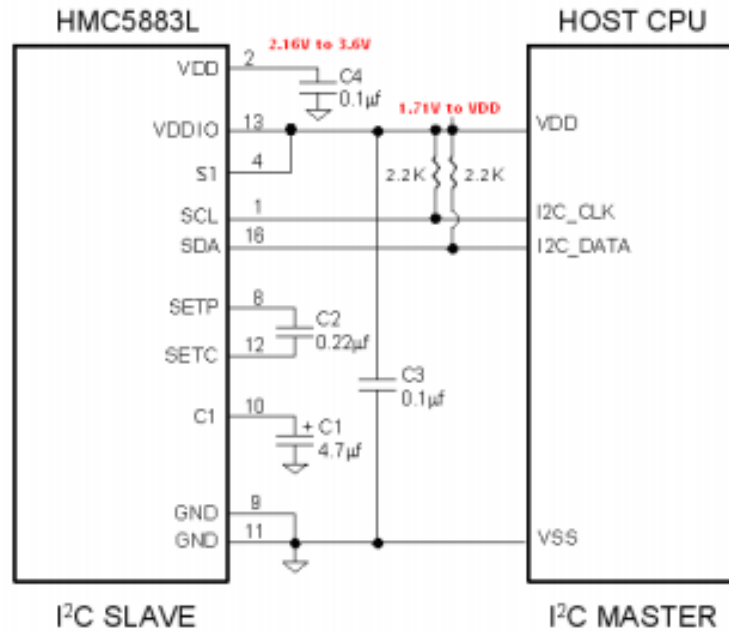
## INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM

### HMC5883L

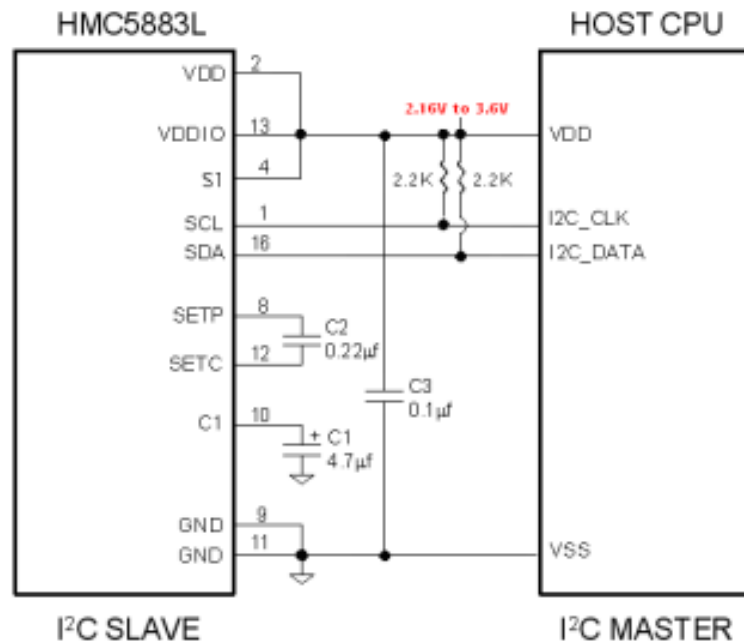


## HMC5883L

### DUAL SUPPLY REFERENCE DESIGN



### SINGLE SUPPLY REFERENCE DESIGN

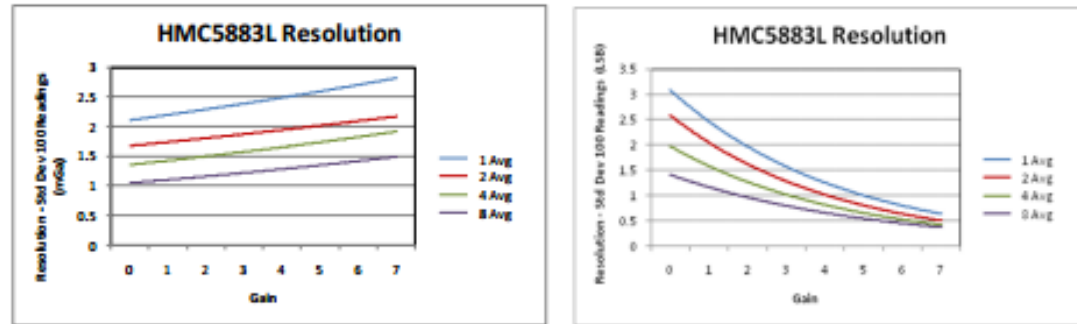


## HMC5883L

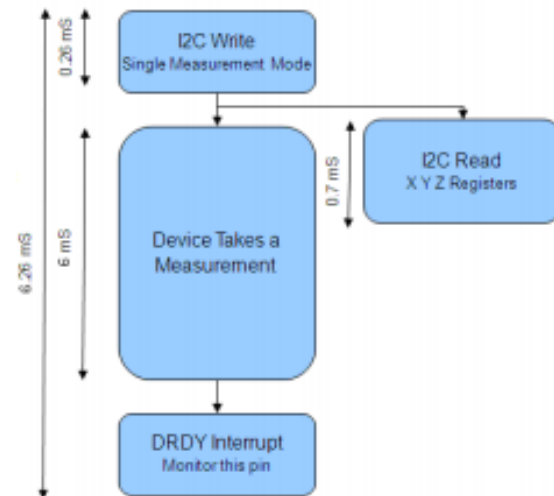
### PERFORMANCE

The following graph(s) highlight HMC5883L's performance.

#### Typical Noise Floor (Field Resolution)



#### Typical Measurement Period in Single-Measurement Mode



\* Monitoring of the DRDY Interrupt pin is only required if maximum output rate is desired.

## HMC5883L

### BASIC DEVICE OPERATION

#### Anisotropic Magneto-Resistive Sensors

The Honeywell HMC5883L magnetoresistive sensor circuit is a trio of sensors and application specific support circuits to measure magnetic fields. With power supply applied, the sensor converts any incident magnetic field in the sensitive axis directions to a differential voltage output. The magnetoresistive sensors are made of a nickel-iron (Permalloy) thin-film and patterned as a resistive strip element. In the presence of a magnetic field, a change in the bridge resistive elements causes a corresponding change in voltage across the bridge outputs.

These resistive elements are aligned together to have a common sensitive axis (indicated by arrows in the pinout diagram) that will provide positive voltage change with magnetic fields increasing in the sensitive direction. Because the output is only proportional to the magnetic field component along its axis, additional sensor bridges are placed at orthogonal directions to permit accurate measurement of magnetic field in any orientation.

#### Self Test

To check the HMC5883L for proper operation, a self test feature is incorporated in which the sensor is internally excited with a nominal magnetic field (in either positive or negative bias configuration). This field is then measured and reported. This function is enabled and the polarity is set by bits MS[n] in the configuration register A. An internal current source generates DC current (about 10 mA) from the VDD supply. This DC current is applied to the offset straps of the magnetoresistive sensor, which creates an artificial magnetic field bias on the sensor. The difference of this measurement and the measurement of the ambient field will be put in the data output register for each of the three axes. By using this built-in function, the manufacturer can quickly verify the sensor's full functionality after the assembly without additional test setup. The self test results can also be used to estimate/compensate the sensor's sensitivity drift due to temperature.

For each "self test measurement", the ASIC:

1. Sends a "Set" pulse
2. Takes one measurement (M1)
3. Sends the (~10 mA) offset current to generate the (~1.1 Gauss) offset field and takes another measurement (M2)
4. Puts the difference of the two measurements in sensor's data output register:

$$\text{Output} = [M2 - M1] \quad (\text{i.e. output} = \text{offset field only})$$

See SELF TEST OPERATION section later in this datasheet for additional details.

#### Power Management

This device has two different domains of power supply. The first one is VDD that is the power supply for internal operations and the second one is VDDIO that is dedicated to IO interface. It is possible to work with VDDIO equal to VDD; Single Supply mode, or with VDDIO lower than VDD allowing HMC5883L to be compatible with other devices on board.

#### I<sup>2</sup>C Interface

Control of this device is carried out via the I<sup>2</sup>C bus. This device will be connected to this bus as a slave device under the control of a master device, such as the processor.

This device is compliant with *I<sup>2</sup>C-Bus Specification*, document number: 9398 393 40011. As an I<sup>2</sup>C compatible device, this device has a 7-bit serial address and supports I<sup>2</sup>C protocols. This device supports standard and fast modes, 100kHz and 400kHz, respectively, but does not support the high speed mode (Hs). External pull-up resistors are required to support these standard and fast speed modes.

Activities required by the master (register read and write) have priority over internal activities, such as the measurement. The purpose of this priority is to not keep the master waiting and the I<sup>2</sup>C bus engaged for longer than necessary.

#### Internal Clock

The device has an internal clock for internal digital logic functions and timing management. This clock is not available to external usage.

www.honeywell.com

9

## HMC5883L

### H-Bridge for Set/Reset Strap Drive

The ASIC contains large switching FETs capable of delivering a large but brief pulse to the Set/Reset strap of the sensor. This strap is largely a resistive load. There is no need for an external Set/Reset circuit. The controlling of the Set/Reset function is done automatically by the ASIC for each measurement. One half of the difference from the measurements taken after a set pulse and after a reset pulse will be put in the data output register for each of the three axes. By doing so, the sensor's internal offset and its temperature dependence is removed/cancelled for all measurements. The set/reset pulses also effectively remove the past magnetic history (magnetism) in the sensor, if any.

For each "measurement", the ASIC:

1. Sends a "Set" pulse
2. Takes one measurement (Mset)
3. Sends a "Reset" pulse
4. Takes another measurement (Mreset)
5. Puts the following result in sensor's data output register:

$$\text{Output} = [\text{Mset} - \text{Mreset}] / 2$$

### Charge Current Limit

The current that reservoir capacitor (C1) can draw when charging is limited for both single supply and dual supply configurations. This prevents drawing down the supply voltage (VDD).

## MODES OF OPERATION

This device has several operating modes whose primary purpose is power management and is controlled by the Mode Register. This section describes these modes.

### Continuous-Measurement Mode

During continuous-measurement mode, the device continuously makes measurements, at user selectable rate, and places measured data in data output registers. Data can be re-read from the data output registers if necessary; however, if the master does not ensure that the data register is accessed before the completion of the next measurement, the data output registers are updated with the new measurement. To conserve current between measurements, the device is placed in a state similar to idle mode, but the Mode Register is not changed to Idle Mode. That is, MD[n] bits are unchanged. Settings in the Configuration Register A affect the data output rate (bits DO[n]), the measurement configuration (bits MS[n]), when in continuous-measurement mode. All registers maintain values while in continuous-measurement mode. The I<sup>2</sup>C bus is enabled for use by other devices on the network while continuous-measurement mode.

### Single-Measurement Mode

This is the default power-up mode. During single-measurement mode, the device makes a single measurement and places the measured data in data output registers. After the measurement is complete and output data registers are updated, the device is placed in idle mode, and the Mode Register is changed to idle mode by setting MD[n] bits. Settings in the configuration register affect the measurement configuration (bits MS[n]) when in single-measurement mode. All registers maintain values while in single-measurement mode. The I<sup>2</sup>C bus is enabled for use by other devices on the network while in single-measurement mode.

### Idle Mode

During this mode the device is accessible through the I<sup>2</sup>C bus, but major sources of power consumption are disabled, such as, but not limited to, the ADC, the amplifier, and the sensor bias current. All registers maintain values while in idle mode. The I<sup>2</sup>C bus is enabled for use by other devices on the network while in idle mode.



## HMC5883L

### REGISTERS

This device is controlled and configured via a number of on-chip registers, which are described in this section. In the following descriptions, *set* implies a logic 1, and *reset* or *clear* implies a logic 0, unless stated otherwise.

#### Register List

The table below lists the registers and their access. All address locations are 8 bits.

| Address Location | Name                       | Access     |
|------------------|----------------------------|------------|
| 00               | Configuration Register A   | Read/Write |
| 01               | Configuration Register B   | Read/Write |
| 02               | Mode Register              | Read/Write |
| 03               | Data Output X MSB Register | Read       |
| 04               | Data Output X LSB Register | Read       |
| 05               | Data Output Z MSB Register | Read       |
| 06               | Data Output Z LSB Register | Read       |
| 07               | Data Output Y MSB Register | Read       |
| 08               | Data Output Y LSB Register | Read       |
| 09               | Status Register            | Read       |
| 10               | Identification Register A  | Read       |
| 11               | Identification Register B  | Read       |
| 12               | Identification Register C  | Read       |

Table2: Register List

#### Register Access

This section describes the process of reading from and writing to this device. The device uses an address pointer to indicate which register location is to be read from or written to. These pointer locations are sent from the master to this slave device and succeed the 7-bit address (0x1E) plus 1 bit read/write identifier, i.e. 0x3D for read and 0x3C for write.

To minimize the communication between the master and this device, the address pointer is updated automatically without master intervention. The register pointer will be incremented by 1 automatically after the current register has been read successfully.

The address pointer value itself cannot be read via the I<sup>2</sup>C bus.

Any attempt to read an invalid address location returns 0's, and any write to an invalid address location or an undefined bit within a valid address location is ignored by this device.

To move the address pointer to a random register location, first issue a "write" to that register location with no data byte following the command. For example, to move the address pointer to register 10, send 0x3C 0x0A.

## HMC5883L

### Configuration Register A

The configuration register is used to configure the device for setting the data output rate and measurement configuration. CRA0 through CRA7 indicate bit locations, with CRA denoting the bits that are in the configuration register. CRA7 denotes the first bit of the data stream. The number in parenthesis indicates the default value of that bit. CRA default is 0x10.

| CRA7 | CRA6   | CRA5   | CRA4    | CRA3    | CRA2    | CRA1    | CRA0    |
|------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| (0)  | MA1(0) | MA0(0) | DO2 (1) | DO1 (0) | DO0 (0) | MS1 (0) | MS0 (0) |

Table 3: Configuration Register A

| Location     | Name       | Description                                                                                                                                                            |
|--------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CRA7         | CRA7       | Bit CRA7 is reserved for future function. Set to 0 when configuring CRA.                                                                                               |
| CRA6 to CRA5 | MA1 to MA0 | Select number of samples averaged (1 to 8) per measurement output.<br>00 = 1(Default); 01 = 2; 10 = 4; 11 = 8                                                          |
| CRA4 to CRA2 | DO2 to DO0 | Data Output Rate Bits. These bits set the rate at which data is written to all three data output registers.                                                            |
| CRA1 to CRA0 | MS1 to MS0 | Measurement Configuration Bits. These bits define the measurement flow of the device, specifically whether or not to incorporate an applied bias into the measurement. |

Table 4: Configuration Register A Bit Designations

The Table below shows all selectable output rates in continuous measurement mode. All three channels shall be measured within a given output rate. Other output rates with maximum rate of 160 Hz can be achieved by monitoring DRDY interrupt pin in single measurement mode.

| DO2 | DO1 | DO0 | Typical Data Output Rate (Hz) |
|-----|-----|-----|-------------------------------|
| 0   | 0   | 0   | 0.75                          |
| 0   | 0   | 1   | 1.5                           |
| 0   | 1   | 0   | 3                             |
| 0   | 1   | 1   | 7.5                           |
| 1   | 0   | 0   | 15 (Default)                  |
| 1   | 0   | 1   | 30                            |
| 1   | 1   | 0   | 75                            |
| 1   | 1   | 1   | Reserved                      |

Table 5: Data Output Rates

| MS1 | MS0 | Measurement Mode                                                                                                                                                                                                       |
|-----|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0   | 0   | Normal measurement configuration (Default). In normal measurement configuration the device follows normal measurement flow. The positive and negative pins of the resistive load are left floating and high impedance. |
| 0   | 1   | Positive bias configuration for X, Y, and Z axes. In this configuration, a positive current is forced across the resistive load for all three axes.                                                                    |
| 1   | 0   | Negative bias configuration for X, Y and Z axes. In this configuration, a negative current is forced across the resistive load for all three axes..                                                                    |
| 1   | 1   | This configuration is reserved.                                                                                                                                                                                        |

Table 6: Measurement Modes



## HMC5883L

### Configuration Register B

The configuration register B for setting the device gain. CRB0 through CRB7 indicate bit locations, with CRB denoting the bits that are in the configuration register. CRB7 denotes the first bit of the data stream. The number in parenthesis indicates the default value of that bit. CRB default is 0x20.

| CRB7    | CRB6    | CRB5    | CRB4 | CRB3 | CRB2 | CRB1 | CRB0 |
|---------|---------|---------|------|------|------|------|------|
| GN2 (0) | GN1 (0) | GN0 (1) | (0)  | (0)  | (0)  | (0)  | (0)  |

Table 7: Configuration B Register

| Location     | Name       | Description                                                                                                               |
|--------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CRB7 to CRB5 | GN2 to GN0 | Gain Configuration Bits. These bits configure the gain for the device. The gain configuration is common for all channels. |
| CRB4 to CRB0 | 0          | These bits must be cleared for correct operation.                                                                         |

Table 8: Configuration Register B Bit Designations

The table below shows nominal gain settings. Use the "Gain" column to convert counts to Gauss. The "Digital Resolution" column is the theoretical value in term of milli-Gauss per count (LSb) which is the inverse of the values in the "Gain" column. The effective resolution of the usable signal also depends on the noise floor of the system, i.e.

Effective Resolution = Max (Digital Resolution, Noise Floor)

Choose a lower gain value (higher GN#) when total field strength causes overflow in one of the data output registers (saturation). Note that the very first measurement after a gain change maintains the same gain as the previous setting. The new gain setting is effective from the second measurement and on.

| GN2 | GN1 | GN0 | Recommended Sensor Field Range | Gain (LSb/Gauss) | Digital Resolution (mG/LSb) | Output Range               |
|-----|-----|-----|--------------------------------|------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 0   | 0   | 0   | ± 0.88 Ga                      | 1370             | 0.73                        | 0xF800–0x07FF (-2048–2047) |
| 0   | 0   | 1   | ± 1.3 Ga                       | 1090 (default)   | 0.92                        | 0xF800–0x07FF (-2048–2047) |
| 0   | 1   | 0   | ± 1.9 Ga                       | 820              | 1.22                        | 0xF800–0x07FF (-2048–2047) |
| 0   | 1   | 1   | ± 2.5 Ga                       | 660              | 1.52                        | 0xF800–0x07FF (-2048–2047) |
| 1   | 0   | 0   | ± 4.0 Ga                       | 440              | 2.27                        | 0xF800–0x07FF (-2048–2047) |
| 1   | 0   | 1   | ± 4.7 Ga                       | 390              | 2.56                        | 0xF800–0x07FF (-2048–2047) |
| 1   | 1   | 0   | ± 5.6 Ga                       | 330              | 3.03                        | 0xF800–0x07FF (-2048–2047) |
| 1   | 1   | 1   | ± 8.1 Ga                       | 230              | 4.35                        | 0xF800–0x07FF (-2048–2047) |

Table 9: Gain Settings

## HMC5883L

### Mode Register

The mode register is an 8-bit register from which data can be read or to which data can be written. This register is used to select the operating mode of the device. MR0 through MR7 indicate bit locations, with *MR* denoting the bits that are in the mode register. MR7 denotes the first bit of the data stream. The number in parenthesis indicates the default value of that bit. Mode register default is 0x01.

| MR7   | MR6 | MR5 | MR4 | MR3 | MR2 | MR1     | MR0     |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|---------|---------|
| HS(0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | MD1 (0) | MD0 (1) |

Table 10: Mode Register

| Location   | Name       | Description                                                            |
|------------|------------|------------------------------------------------------------------------|
| MR7 to MR2 | HS         | Set this pin to enable High Speed I2C, 3400kHz.                        |
| MR1 to MR0 | MD1 to MD0 | Mode Select Bits. These bits select the operation mode of this device. |

Table 11: Mode Register Bit Designations

| MD1 | MD0 | Operating Mode                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0   | 0   | Continuous-Measurement Mode. In continuous-measurement mode, the device continuously performs measurements and places the result in the data register. RDY goes high when new data is placed in all three registers. After a power-on or a write to the mode or configuration register, the first measurement set is available from all three data output registers after a period of $2/f_{DO}$ and subsequent measurements are available at a frequency of $f_{DO}$ , where $f_{DO}$ is the frequency of data output. |
| 0   | 1   | Single-Measurement Mode (Default). When single-measurement mode is selected, device performs a single measurement, sets RDY high and returned to idle mode. Mode register returns to idle mode bit values. The measurement remains in the data output register and RDY remains high until the data output register is read or another measurement is performed.                                                                                                                                                         |
| 1   | 0   | Idle Mode. Device is placed in idle mode.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 1   | 1   | Idle Mode. Device is placed in idle mode.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

Table 12: Operating Modes

## HMC5883L

### Data Output X Registers A and B

The data output X registers are two 8-bit registers, data output register A and data output register B. These registers store the measurement result from channel X. Data output X register A contains the MSB from the measurement result, and data output X register B contains the LSB from the measurement result. The value stored in these two registers is a 16-bit value in 2's complement form, whose range is 0xF800 to 0x07FF. DXRA0 through DXRA7 and DXRB0 through DXRB7 indicate bit locations, with *DXRA* and *DXRB* denoting the bits that are in the data output X registers. DXRA7 and DXRB7 denote the first bit of the data stream. The number in parenthesis indicates the default value of that bit.

In the event the ADC reading overflows or underflows for the given channel, or if there is a math overflow during the bias measurement, this data register will contain the value -4096. This register value will clear when after the next valid measurement is made.

| DXRA7 | DXRA6 | DXRA5 | DXRA4 | DXRA3 | DXRA2 | DXRA1 | DXRA0 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   |
| DXRB7 | DXRB6 | DXRB5 | DXRB4 | DXRB3 | DXRB2 | DXRB1 | DXRB0 |
| (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   |

Table 13: Data Output X Registers A and B

### Data Output Y Registers A and B

The data output Y registers are two 8-bit registers, data output register A and data output register B. These registers store the measurement result from channel Y. Data output Y register A contains the MSB from the measurement result, and data output Y register B contains the LSB from the measurement result. The value stored in these two registers is a 16-bit value in 2's complement form, whose range is 0xF800 to 0x07FF. DYRA0 through DYRA7 and DYRB0 through DYRB7 indicate bit locations, with *DYRA* and *DYRB* denoting the bits that are in the data output Y registers. DYRA7 and DYRB7 denote the first bit of the data stream. The number in parenthesis indicates the default value of that bit.

In the event the ADC reading overflows or underflows for the given channel, or if there is a math overflow during the bias measurement, this data register will contain the value -4096. This register value will clear when after the next valid measurement is made.

| DYRA7 | DYRA6 | DYRA5 | DYRA4 | DYRA3 | DYRA2 | DYRA1 | DYRA0 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   |
| DYRB7 | DYRB6 | DYRB5 | DYRB4 | DYRB3 | DYRB2 | DYRB1 | DYRB0 |
| (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   |

Table 14: Data Output Y Registers A and B

### Data Output Z Registers A and B

The data output Z registers are two 8-bit registers, data output register A and data output register B. These registers store the measurement result from channel Z. Data output Z register A contains the MSB from the measurement result, and data output Z register B contains the LSB from the measurement result. The value stored in these two registers is a 16-bit value in 2's complement form, whose range is 0xF800 to 0x07FF. DZRA0 through DZRA7 and DZRB0 through DZRB7 indicate bit locations, with *DZRA* and *DZRB* denoting the bits that are in the data output Z registers. DZRA7 and DZRB7 denote the first bit of the data stream. The number in parenthesis indicates the default value of that bit.

In the event the ADC reading overflows or underflows for the given channel, or if there is a math overflow during the bias measurement, this data register will contain the value -4096. This register value will clear when after the next valid measurement is made.

## HMC5883L

| DZRA7 | DZRA6 | DZRA5 | DZRA4 | DZRA3 | DZRA2 | DZRA1 | DZRA0 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   |
| DZRB7 | DZRB6 | DZRB5 | DZRB4 | DZRB3 | DZRB2 | DZRB1 | DZRB0 |
| (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   | (0)   |

Table 15: Data Output Z Registers A and B

### Data Output Register Operation

When one or more of the output registers are read, new data cannot be placed in any of the output data registers until all six data output registers are read. This requirement also impacts DRDY and RDY, which cannot be cleared until new data is placed in all the output registers.

### Status Register

The status register is an 8-bit read-only register. This register is used to indicate device status. SR0 through SR7 indicate bit locations, with SR denoting the bits that are in the status register. SR7 denotes the first bit of the data stream.

| SR7 | SR6 | SR5 | SR4 | SR3 | SR2 | SR1      | SR0    |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|--------|
| (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | LOCK (0) | RDY(0) |

Table 16: Status Register

| Location   | Name | Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SR7 to SR2 | 0    | These bits are reserved.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| SR1        | LOCK | Data output register lock. This bit is set when:<br>1. some but not all for of the six data output registers have been read,<br>2. Mode register has been read.<br>When this bit is set, the six data output registers are locked and any new data will not be placed in these register until one of these conditions are met:<br>1. all six bytes have been read, 2. the mode register is changed,<br>3. the measurement configuration (CRA) is changed,<br>4. power is reset. |
| SR0        | RDY  | Ready Bit. Set when data is written to all six data registers. Cleared when device initiates a write to the data output registers and after one or more of the data output registers are written to. When RDY bit is clear it shall remain cleared for a 250 $\mu$ s. DRDY pin can be used as an alternative to the status register for monitoring the device for measurement data.                                                                                             |

Table 17: Status Register Bit Designations



## HMC5883L

### Identification Register A

The identification register A is used to identify the device. IRA0 through IRA7 indicate bit locations, with *IRA* denoting the bits that are in the identification register A. IRA7 denotes the first bit of the data stream. The number in parenthesis indicates the default value of that bit.

The identification value for this device is stored in this register. This is a read-only register.  
Register values. ASCII value *H*

| IRA7 | IRA6 | IRA5 | IRA4 | IRA3 | IRA2 | IRA1 | IRA0 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0    | 1    | 0    | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    |

Table 18: Identification Register A Default Values

### Identification Register B

The identification register B is used to identify the device. IRB0 through IRB7 indicate bit locations, with *IRB* denoting the bits that are in the identification register A. IRB7 denotes the first bit of the data stream.

Register values. ASCII value *4*

| IRB7 | IRB6 | IRB5 | IRB4 | IRB3 | IRB2 | IRB1 | IRB0 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0    | 0    | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 0    |

Table 19: Identification Register B Default Values

### Identification Register C

The identification register C is used to identify the device. IRC0 through IRC7 indicate bit locations, with *IRC* denoting the bits that are in the identification register A. IRC7 denotes the first bit of the data stream.

Register values. ASCII value *3*

| IRC7 | IRC6 | IRC5 | IRC4 | IRC3 | IRC2 | IRC1 | IRC0 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0    | 0    | 1    | 1    | 0    | 0    | 1    | 1    |

Table 20: Identification Register C Default Values

## I<sup>2</sup>C COMMUNICATION PROTOCOL

The HMC5883L communicates via a two-wire I<sup>2</sup>C bus system as a slave device. The HMC5883L uses a simple protocol with the interface protocol defined by the I<sup>2</sup>C bus specification, and by this document. The data rate is at the standard-mode 100kbps or 400kbps rates as defined in the I<sup>2</sup>C Bus Specifications. The bus bit format is an 8-bit Data/Address send and a 1-bit acknowledge bit. The format of the data bytes (payload) shall be case sensitive ASCII characters or binary data to the HMC5883L slave, and binary data returned. Negative binary values will be in two's complement form. The default (factory) HMC5883L 8-bit slave address is 0x3C for write operations, or 0x3D for read operations.

The HMC5883L Serial Clock (SCL) and Serial Data (SDA) lines require resistive pull-ups (Rp) between the master device (usually a host microprocessor) and the HMC5883L. Pull-up resistance values of about 2.2K to 10K ohms are recommended with a nominal VDDIO voltage. Other resistor values may be used as defined in the I<sup>2</sup>C Bus Specifications that can be tied to VDDIO.

The SCL and SDA lines in this bus specification may be connected to multiple devices. The bus can be a single master to multiple slaves, or it can be a multiple master configuration. All data transfers are initiated by the master device, which is responsible for generating the clock signal, and the data transfers are 8 bit long. All devices are addressed by I<sup>2</sup>C's unique 7-bit address. After each 8-bit transfer, the master device generates a 9<sup>th</sup> clock pulse, and releases the SDA line. The receiving device (addressed slave) will pull the SDA line low to acknowledge (ACK) the successful transfer or leave the SDA high to negative acknowledge (NACK).

## HMC5883L

Per the I<sup>2</sup>C spec, all transitions in the SDA line must occur when SCL is low. This requirement leads to two unique conditions on the bus associated with the SDA transitions when SCL is high. Master device pulling the SDA line low while the SCL line is high indicates the Start (S) condition, and the Stop (P) condition is when the SDA line is pulled high while the SCL line is high. The I<sup>2</sup>C protocol also allows for the Restart condition in which the master device issues a second start condition without issuing a stop.

All bus transactions begin with the master device issuing the start sequence followed by the slave address byte. The address byte contains the slave address; the upper 7 bits (bits 7-1), and the Least Significant bit (LSb). The LSb of the address byte designates if the operation is a read (LSb=1) or a write (LSb=0). At the 9<sup>th</sup> clock pulse, the receiving slave device will issue the ACK (or NACK). Following these bus events, the master will send data bytes for a write operation, or the slave will clock out data with a read operation. All bus transactions are terminated with the master issuing a stop sequence.

I<sup>2</sup>C bus control can be implemented with either hardware logic or in software. Typical hardware designs will release the SDA and SCL lines as appropriate to allow the slave device to manipulate these lines. In a software implementation, care must be taken to perform these tasks in code.

### OPERATIONAL EXAMPLES

The HMC5883L has a fairly quick stabilization time from no voltage to stable and ready for data retrieval. The nominal 56 milli-seconds with the factory default single measurement mode means that the six bytes of magnetic data registers (DXRA, DXRB, DZRA, DZRB, DYRA, and DYRB) are filled with a valid first measurement.

To change the measurement mode to continuous measurement mode, after the power-up time send the three bytes:

0x3C 0x02 0x00

This writes the 00 into the second register or mode register to switch from single to continuous measurement mode setting. With the data rate at the factory default of 15Hz updates, a 67 milli-second typical delay should be allowed by the I<sup>2</sup>C master before querying the HMC5883L data registers for new measurements. To clock out the new data, send:

0x3D, and clock out DXRA, DXRB, DZRA, DZRB, DYRA, and DYRB located in registers 3 through 8. The HMC5883L will automatically re-point back to register 3 for the next 0x3D query. All six data registers must be read properly before new data can be placed in any of these data registers.

Below is an example of a (power-on) initialization process for "continuous-measurement mode":

1. Write CRA (00) – send 0x3C 0x00 0x70 (8-average, 15 Hz default, normal measurement)
  2. Write CRB (01) – send 0x3C 0x01 0xA0 (Gain=5, or any other desired gain)
  3. Write Mode (02) – send 0x3C 0x02 0x00 (Continuous-measurement mode)
  4. Wait 6 ms or monitor status register or DRDY hardware interrupt pin
  5. Loop
    - Send 0x3D 0x06 (Read all 6 bytes. If gain is changed then this data set is using previous gain)
    - Convert three 16-bit 2's complement hex values to decimal values and assign to X, Z, Y, respectively.
    - Send 0x3C 0x03 (point to first data register 03)
    - Wait about 67 ms (if 15 Hz rate) or monitor status register or DRDY hardware interrupt pin
- End\_loop

Below is an example of a (power-on) initialization process for "single-measurement mode":

1. Write CRA (00) – send 0x3C 0x00 0x70 (8-average, 15 Hz default or any other rate, normal measurement)
2. Write CRB (01) – send 0x3C 0x01 0xA0 (Gain=5, or any other desired gain)
3. For each measurement query:
  - Write Mode (02) – send 0x3C 0x02 0x01 (Single-measurement mode)
  - Wait 6 ms or monitor status register or DRDY hardware interrupt pin
  - Send 0x3D 0x06 (Read all 6 bytes. If gain is changed then this data set is using previous gain)
  - Convert three 16-bit 2's complement hex values to decimal values and assign to X, Z, Y, respectively.

## HMC5883L

### SELF TEST OPERATION

To check the HMC5883L for proper operation, a self test feature is incorporated in which the sensor offset straps are excited to create a nominal field strength (bias field) to be measured. To implement self test, the least significant bits (MS1 and MS0) of configuration register A are changed from 00 to 01 (positive bias) or 10 (negative bias).

Then, by placing the mode register into single or continuous-measurement mode, two data acquisition cycles will be made on each magnetic vector. The first acquisition will be a set pulse followed shortly by measurement data of the external field. The second acquisition will have the offset strap excited (about 10 mA) in the positive bias mode for X, Y, and Z axes to create about a 1.1 gauss self test field plus the external field. The first acquisition values will be subtracted from the second acquisition, and the net measurement will be placed into the data output registers.

Since self test adds ~1.1 Gauss additional field to the existing field strength, using a reduced gain setting prevents sensor from being saturated and data registers overflowed. For example, if the configuration register B is set to 0xA0 (Gain=5), values around +452 LSB (1.16 Ga \* 390 LSB/Ga) will be placed in the X and Y data output registers and around +421 (1.08 Ga \* 390 LSB/Ga) will be placed in Z data output register. To leave the self test mode, change MS1 and MS0 bit of the configuration register A back to 00 (Normal Measurement Mode). Acceptable limits of the self test values depend on the gain setting. Limits for Gain=5 is provided in the specification table.

Below is an example of a "positive self test" process using continuous-measurement mode:

1. Write CRA (00) – send 0x3C 0x00 0x71 (8-average, 15 Hz default, positive self test measurement)
2. Write CRB (01) – send 0x3C 0x01 0xA0 (Gain=5)
3. Write Mode (02) – send 0x3C 0x02 0x00 (Continuous-measurement mode)
4. Wait 6 ms or monitor status register or DRDY hardware interrupt pin
5. Loop
  - Send 0x3D 0x06 (Read all 6 bytes. If gain is changed then this data set is using previous gain)
  - Convert three 16-bit 2's complement hex values to decimal values and assign to X, Z, Y, respectively.
  - Send 0x3C 0x03 (point to first data register 03)
  - Wait about 67 ms (if 15 Hz rate) or monitor status register or DRDY hardware interrupt pin
- End\_loop
6. Check limits –
  - If all 3 axes (X, Y, and Z) are within reasonable limits (243 to 575 for Gain=5, adjust these limits basing on the gain setting used. See an example below.) Then
    - All 3 axes pass positive self test
    - Write CRA (00) – send 0x3C 0x00 0x70 (Exit self test mode and this procedure)
  - Else
    - If Gain<7
      - Write CRB (01) – send 0x3C 0x01 0x\_0 (Increase gain setting and retry, skip the next data set)
    - Else
      - At least one axis did not pass positive self test
      - Write CRA (00) – send 0x3C 0x00 0x70 (Exit self test mode and this procedure)
- End If

Below is an example of how to adjust the "positive self" test limits basing on the gain setting:

1. If Gain = 6, self test limits are:
  - Low Limit =  $243 * 330/390 = 206$
  - High Limit =  $575 * 330/390 = 487$
2. If Gain = 7, self test limits are:
  - Low Limit =  $243 * 230/390 = 143$
  - High Limit =  $575 * 230/390 = 339$



## HMC5883L

### SCALE FACTOR TEMPERATURE COMPENSATION

The built-in self test can also be used to periodically compensate the scaling errors due to temperature variations. A compensation factor can be found by comparing the self test outputs with the ones obtained at a known temperature. For example, if the self test output is 400 at room temperature and 300 at the current temperature then a compensation factor of (400/300) should be applied to all current magnetic readings. A temperature sensor is not required using this method.

Below is an example of a temperature compensation process using positive self test method:

1. If self test measurement at a temperature "when the last magnetic calibration was done":

X\_STP = 400

Y\_STP = 410

Z\_STP = 420

2. If self test measurement at a different temperature:

X\_STP = 300 (Lower than before)

Y\_STP = 310 (Lower than before)

Z\_STP = 320 (Lower than before)

Then

X\_TempComp = 400/300

Y\_TempComp = 410/310

Z\_TempComp = 420/320

3. Applying to all new measurements:

X = X \* X\_TempComp

Y = Y \* Y\_TempComp

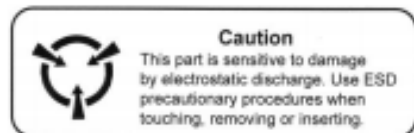
Z = Z \* Z\_TempComp

Now all 3 axes are temperature compensated, i.e. sensitivity is same as "when the last magnetic calibration was done"; therefore, the calibration coefficients can be applied without modification.

4. Repeat this process periodically or, for every  $\Delta t$  degrees of temperature change measured, if available.

### ORDERING INFORMATION

| Ordering Number | Product                      |
|-----------------|------------------------------|
| HMC5883L-T      | Cut Tape                     |
| HMC5883L-TR     | Tape and Reel 4k pieces/reel |



**CAUTION: ESDS CAT. 1B**

### FIND OUT MORE

For more information on Honeywell's Magnetic Sensors visit us online at [www.magneticsensors.com](http://www.magneticsensors.com) or contact us at 1-800-323-8295 (763-954-2474 internationally).

The application circuits herein constitute typical usage and interface of Honeywell product. Honeywell does not warranty or assume liability of customer-designed circuits derived from this description or depiction.

Honeywell reserves the right to make changes to improve reliability, function or design. Honeywell does not assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit described herein; neither does it convey any license under its patent rights nor the rights of others.

U.S. Patents 4,441,072, 4,533,872, 4,569,742, 4,681,812, 4,847,584 and 6,529,114 apply to the technology described

Honeywell  
12001 Highway 55  
Plymouth, MN 55441  
Tel: 800-323-8295  
[www.magneticsensors.com](http://www.magneticsensors.com)

Form # 900405 Rev E  
February 2013  
©2010 Honeywell International Inc.

**Honeywell**



## Anexo D. Hoja de datos Xbee Serie 2.

### Product Datasheet

# XBee™ ZigBee®/802.15.4 Modules

2.4 GHz OEM RF Modules



Part of Digi's Drop-in Networking product family, XBee OEM RF modules provide reliable, wireless data communication over ZigBee/802.15.4 networks. Available in Series 1 or Series 2 models for point-to-multipoint or mesh topologies, they enable OEMs with excellent wireless performance in a cost-effective, small form factor solution.



### Features/Benefits

- ZigBee/802.15.4 compatible RF modules
- 2.4 GHz ISM band for use worldwide
- Fully interoperable with other Digi Drop-in Networking products, including gateways, device adapters and extenders
- Available in Series 1 or Series 2 models for point-to-multipoint or mesh topologies
- Pin-swappable regular and long-range -PRO versions
- Low cost
- Common footprint for a variety of Digi RF modules
- Low-power sleep modes
- Multiple antenna options
- Industrial temperature (-40° C to 85° C)

## Overview

The XBee family of ZigBee/802.15.4 RF modules is the premiere choice for OEMs looking for excellent wireless performance in a cost-effective, small form factor solution. Each XBee module comes in either a regular or long-range "-PRO" version\*. All XBee modules are pin-for-pin compatible with the exception of a few varying I/O features, which provides a standard footprint for OEMs with multiple applications.



XBee Series 1 is based on ZigBee/802.15.4 silicon from Freescale®. Its 802.15.4 firmware feature set makes it ideal for point-to-point, peer-to-peer, and point-to-multipoint (star) topologies. The XBee Series 1 gives the user maximum control over network nodes and minimum latency.

XBee Series 2 is based on ZigBee/802.15.4 silicon from Ember™. It features ZigBee firmware for creating ad-hoc mesh networks. The XBee Series 2 performs automatic route discoveries to create a self-healing network of full-function routers and low-power end devices. XBee Series 1 and Series 2 modules do not communicate with one another.

Known for ease of use, the XBee modules are ready to operate out of the box and offer simple AT commands or an API for advanced, user-settable configurations. XBee modules are recognized worldwide for reliable wireless data communication in the license-free 2.4 GHz ISM band. Visit our website for a complete listing of countries that have approved the XBee as a certified, license-free RF module with no need for further testing.

XBee modules are a part of Digi's full line of Drop-in Networking products. ConnectPort X gateways and XBee device adapters, modules and extenders provide end-to-end wireless connectivity to commercial-grade electronic devices in locations where wired infrastructure does not exist or satisfy customer needs. To learn more about Drop-in Networking, visit [www.digi.com/products/wirelessdropinnetworking](http://www.digi.com/products/wirelessdropinnetworking).

## Features/Specifications

| Product Selection Guide        | Series 1                                                                                             |                      | Series 2                                                                                           |                       |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Silicon                        | Freescale                                                                                            |                      | Ember                                                                                              |                       |
| Firmware                       | 802.15.4                                                                                             |                      | ZigBee                                                                                             |                       |
| Network Topologies             | Point-to-point, peer-to-peer, point-to-multipoint (star)                                             |                      | Mesh                                                                                               |                       |
|                                | XBee™ (Series 1)                                                                                     | XBee-PRO™ (Series 1) | XBee™ (Series 2)                                                                                   | XBee-PRO™ (Series 2)* |
| Indoor/Urban range             | 100 ft (30 m)                                                                                        | 300 ft (90 m)        | 133 ft (40 m)                                                                                      | n/a                   |
| Outdoor/RF Line-of-Sight Range | 300 ft (90 m)                                                                                        | 1 mi (1.6 km)        | 400 ft (120 m)                                                                                     | n/a                   |
|                                | <br>802.15.4 - Star |                      | <br>ZigBee - Mesh |                       |

\* XBee-PRO Series 2 coming soon.

### PERFORMANCE

- General**
- RF data rate: 250 Kbps
  - Operating temperature: -40° C to 85° C (-40° F to 185° F)
- Series 1 (XBee / XBee-PRO)**
- Indoor/Urban range: 100 ft (30 m) / 300 ft (90 m)
  - Outdoor/RF line-of-sight range: 300 ft (90 m) / 1 mi (1.6 km)
  - Transmit power output: 1 mW (0 dBm) / 60 mW (+18 dBm) - Note: In Europe XBeePRO modules must be set to 10 mW (10 dBm). In Japan XBP modules are calibrated to 10 mW (10 dBm).
  - Receiver sensitivity (1% PER): -92 dBm / -100 dBm
- Series 2 (XBee)**
- Indoor/Urban range: 133 ft (40 m)
  - Outdoor/RF line-of-sight range: 400 ft (120 m)
  - Transmit power output: 1.25 mW (+1 dBm) (2 mW (+3 dBm) boost mode)
  - Receiver sensitivity (1% PER): -97 dBm (-98 dBm boost mode)

### FEATURES

- General**
- Serial data interface: 3.3V CMOS UART
  - Configuration method: API or AT commands, local or over-the-air
  - Frequency band: 2.4 GHz
  - Interference immunity: DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) channels
- Series 1**
- Serial data rate: 1200 - 250000 bps
  - (6) 10-bit ADC inputs, (8) Digital I/O
- Series 2**
- Serial data rate: 1200 - 1 Mbps
  - (4) 10-bit ADC inputs, (10) Digital I/O

### NETWORKING AND SECURITY

- Encryption: AES 128-bit
- Reliable packet delivery: Retries/Acknowledgments
- PAN ID, 64-bit IEEE MAC address, 16 channels (12 channels - XBee-PRO Series 1)

### POWER REQUIREMENTS

- Series 1 (XBee / XBee-PRO)**
- Supply voltage: 2.8 - 3.4 VDC / 2.8 - 3.4 VDC
  - Transmit current (@ 3.3 V): 45 mA / 215 mA
  - Receive current (@ 3.3 V): 50 mA / 55 mA
  - Power-down current: <10 uA / <10 uA
- Series 2 (XBee)**
- Supply voltage: 2.1 - 3.6 VDC
  - Transmit current (@ 3.3 V): 35 mA (40 mA boost mode)
  - Receive current (@ 3.3 V): 38 mA (40 mA boost mode)
  - Power-down current: <1 uA (@ 25 °C)

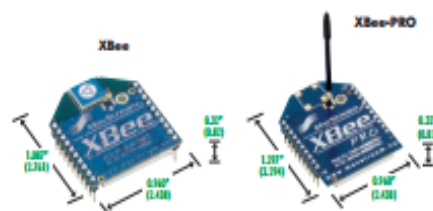
### ANTENNA OPTIONS

- Wire whip antenna
- Chip antenna
- U.FI RF connector
- RPSMA female RF connector

### REGULATORY APPROVALS

- Series 1 (XBee / XBee-PRO)**
- U.S. (FCC Part 15.247): OUR-XBEE / OUR-XBEEPRO
  - Canada (IC): 4214A-XBEE / 4214A-XBEEPRO
  - Europe (CE): ETSI / ETSI (max. tx power output: 10 mW)
  - Australia
  - Japan
- Series 2 (XBee)**
- U.S. (FCC Part 15.247): OUR-XBEE2
  - Canada (IC): 4214A-XBEE2
  - Europe (CE): ETSI
  - Japan

Please visit [www.digi.com](http://www.digi.com) for part numbers.





## LM7800 Series 3-Terminal Fixed Voltage Regulators

### THREE-TERMINAL POSITIVE VOLTAGE REGULATORS

These voltage regulators are monolithic integrated circuits designed as fixed-voltage regulators for a wide variety of applications including local, on-card regulation. These regulators employ internal current limiting, thermal shutdown, and safe-area

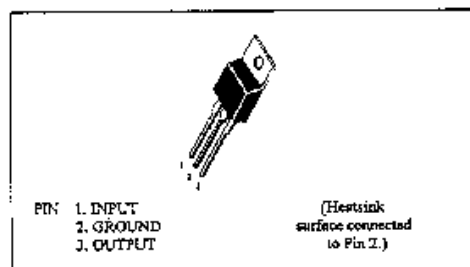
compensation. With adequate heatsinking they can deliver output currents in excess of 1.5 ampere.

Although designed primarily as a fixed voltage regulator, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.

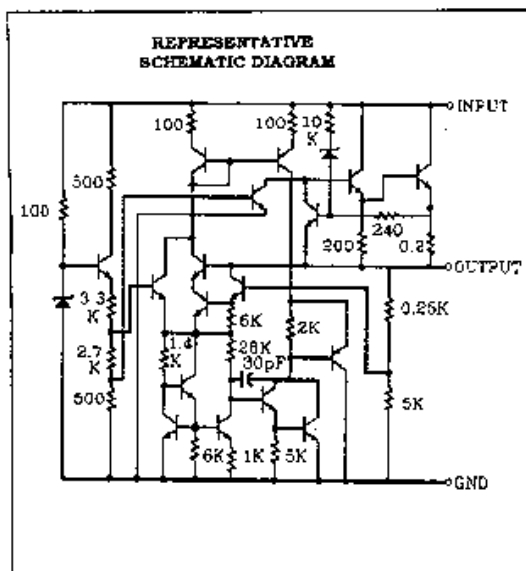
### FEATURES

- Output Current in Excess of 1.5 Ampere
- No External Components Required
- Internal Thermal Overload Protection
- Internal Short-Circuit Current Limiting
- Output Transistor Safe-Area Compensation
- Output Voltage Offered in 2% Tolerance

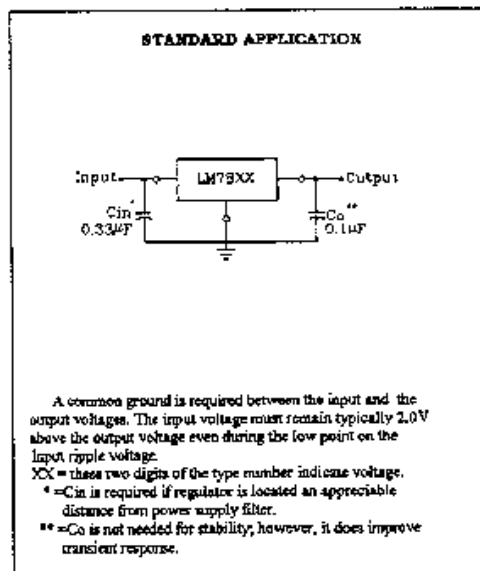
### PIN ARRANGEMENT



### CIRCUIT SCHEMATIC



### TYPICAL CONNECTING CIRCUIT



**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Ta=25°C)**

| Item                           | Symbol | LM7800 Series | Unit |
|--------------------------------|--------|---------------|------|
| Input Voltage                  | Vin *  | 30            | V    |
| Input Voltage                  | Vin ** | 40            | V    |
| Power Dissipation              | PO *** | 15            | W    |
| Operating Ambient Temperature  | ToPr   | -20 to +75    | °C   |
| Operating Junction Temperature | Tj     | -20 to +125   | °C   |
| Storage Temperature            | Tstg   | -55 to +125   | °C   |

Note: \*LM7805 to LM7818

\*\*LM7824

\*\*\*Follow the derating curve

**LM7805 ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

(Vin=10V, Iout=500mA, 0°C ≤ Tj ≤ 125°C, Cin=0.33µF, Cout=0.1µF; unless otherwise specified.)

| Item                                      | Symbol      | Test Conditions                             | min. | typ. | max. | unit  |
|-------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------|------|------|------|-------|
| Output Voltage                            | Vout        | Tj=25°C                                     | 4.90 | 5.0  | 5.10 | V     |
|                                           |             | 7V ≤ Vin ≤ 20V, 5mA ≤ Iout ≤ 1.0A, PO ≤ 15W | 4.85 | —    | 5.15 | V     |
| Line Regulation                           | REGline     | Tj=25°C                                     | —    | 3    | 100  | mV    |
|                                           |             | 7V ≤ Vin ≤ 25V                              | —    | 1    | 50   | mV    |
| Load Regulation                           | REGload     | Tj=25°C                                     | —    | 15   | 100  | mV    |
|                                           |             | 5mA ≤ Iout ≤ 1.5A                           | —    | 5    | 50   | mV    |
| Quiescent Current                         | Iq          | Tj=25°C, Iout=0                             | —    | 4.2  | 8.0  | mA    |
| Quiescent Current Change                  | Δ Iq        | 7V ≤ Vin ≤ 25V                              | —    | —    | 1.3  | mA    |
|                                           |             | 5mA ≤ Iout ≤ 1.0A                           | —    | —    | 0.5  | mA    |
| Output Noise Voltage                      | Vn          | Ta=25°C, 10Hz ≤ f ≤ 100KHz                  | —    | 40   | —    | µV    |
| Ripple Rejection Ratio                    | RR          | f=120Hz                                     | 62   | 78   | —    | dB    |
| Voltage Drop                              | Vdrop       | Iout=1.0A, Tj=25°C                          | —    | 2.0  | —    | V     |
| Output Resistance                         | Rout        | f=1KHz                                      | —    | 17   | —    | mΩ    |
| Output Short Circuit Current              | Ios         | Tj=25°C                                     | —    | 750  | —    | mA    |
| Peak Output Current                       | Io peak     | Tj=25°C                                     | —    | 2.2  | —    | A     |
| Temperature Coefficient of Output Voltage | Δ Vout/Δ Tj | Iout=5mA, 0°C ≤ Tj ≤ 125°C                  | —    | -1.1 | —    | mV/°C |

**LM7806 ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

( $V_{in}=11V$ ,  $I_{out}=500mA$ ,  $0^{\circ}C \leq T_J \leq 125^{\circ}C$ ,  $C_{in}=0.33\mu F$ ,  $C_{out}=0.1\mu F$ ; unless otherwise specified.)

| Item                                      | Symbol                      | Test Conditions                                                           | min.                            | typ. | max. | unit            |
|-------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------|------|-----------------|
| Output Voltage                            | $V_{out}$                   | $T_J=25^{\circ}C$                                                         | 5.88                            | 6.0  | 6.12 | V               |
|                                           |                             | $8V \leq V_{in} \leq 21V$ , $5mA \leq I_{out} \leq 1.0A$ , $P_D \leq 15W$ | 5.83                            | —    | 6.17 | V               |
| Line Regulation                           | $\Delta V_{REGline}$        | $T_J=25^{\circ}C$                                                         | $8V \leq V_{in} \leq 25V$       | —    | 5    | mV              |
|                                           |                             |                                                                           | $9V \leq V_{in} \leq 13V$       | —    | 1.5  | mV              |
|                                           |                             |                                                                           | $5mA \leq I_{out} \leq 1.5A$    | —    | 14   | mV              |
| Load Regulation                           | $\Delta V_{REGload}$        | $T_J=25^{\circ}C$                                                         | $250mA \leq I_{out} \leq 750mA$ | —    | 4.0  | mV              |
| Quiescent Current                         | $I_q$                       | $T_J=25^{\circ}C$ , $I_{out}=0$                                           | —                               | 4.3  | 8.0  | mA              |
| Quiescent Current Change                  | $\Delta I_q$                | $8V \leq V_{in} \leq 25V$                                                 | —                               | —    | 1.3  | mA              |
|                                           |                             | $5mA \leq I_{out} \leq 1.0A$                                              | —                               | —    | 0.5  | mA              |
| Output Noise Voltage                      | $V_n$                       | $T_a=25^{\circ}C$ , $10Hz \leq f \leq 100KHz$                             | —                               | 45   | —    | $\mu V$         |
| Ripple Rejection Ratio                    | $RR_r$                      | $f=120Hz$                                                                 | 59                              | 75   | —    | dB              |
| Voltage Drop                              | $V_{drop}$                  | $I_{out}=1.0A$ , $T_J=25^{\circ}C$                                        | —                               | 2.0  | —    | V               |
| Output Resistance                         | $R_{out}$                   | $f=1KHz$                                                                  | —                               | 19   | —    | $m\Omega$       |
| Output Short Circuit Current              | $I_{os}$                    | $T_J=25^{\circ}C$                                                         | —                               | 550  | —    | mA              |
| Peak Output Current                       | $I_{o peak}$                | $T_J=25^{\circ}C$                                                         | —                               | 2.2  | —    | A               |
| Temperature Coefficient of Output Voltage | $\Delta V_{out}/\Delta T_J$ | $I_{out}=5mA$ , $0^{\circ}C \leq T_J \leq 125^{\circ}C$                   | —                               | -0.8 | —    | mV/ $^{\circ}C$ |

**LM7808 ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

( $V_{in}=14V$ ,  $I_{out}=500mA$ ,  $0^{\circ}C \leq T_J \leq 125^{\circ}C$ ,  $C_{in}=0.33\mu F$ ,  $C_{out}=0.1\mu F$ ; unless otherwise specified.)

| Item                                      | Symbol                      | Test Conditions                                                              | min.                            | typ. | max. | unit            |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------|------|-----------------|
| Output Voltage                            | $V_{out}$                   | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | 7.84                            | 8.0  | 8.16 | V               |
|                                           |                             | $10.5V \leq V_{in} \leq 23V$ , $5mA \leq I_{out} \leq 1.0A$ , $P_D \leq 15W$ | 7.74                            | —    | 8.26 | V               |
| Line Regulation                           | $\Delta V_{REGline}$        | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | $10.5V \leq V_{in} \leq 25V$    | —    | 6    | mV              |
|                                           |                             |                                                                              | $11V \leq V_{in} \leq 17V$      | —    | 2.0  | mV              |
|                                           |                             |                                                                              | $5mA \leq I_{out} \leq 1.5A$    | —    | 12   | mV              |
| Load Regulation                           | $\Delta V_{REGload}$        | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | $250mA \leq I_{out} \leq 750mA$ | —    | 4    | mV              |
| Quiescent Current                         | $I_q$                       | $T_J=25^{\circ}C$ , $I_{out}=0$                                              | —                               | 4.3  | 8.0  | mA              |
| Quiescent Current Change                  | $\Delta I_q$                | $10.5V \leq V_{in} \leq 25V$                                                 | —                               | —    | 1.0  | mA              |
|                                           |                             | $5mA \leq I_{out} \leq 1.0A$                                                 | —                               | —    | 0.5  | mA              |
| Output Noise Voltage                      | $V_n$                       | $T_a=25^{\circ}C$ , $10Hz \leq f \leq 100KHz$                                | —                               | 52   | —    | $\mu V$         |
| Ripple Rejection Ratio                    | $RR_r$                      | $f=120Hz$                                                                    | 56                              | 72   | —    | dB              |
| Voltage Drop                              | $V_{drop}$                  | $I_{out}=1.0A$ , $T_J=25^{\circ}C$                                           | —                               | 2.0  | —    | V               |
| Output Resistance                         | $R_{out}$                   | $f=1KHz$                                                                     | —                               | 16   | —    | $m\Omega$       |
| Output Short Circuit Current              | $I_{os}$                    | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | —                               | 450  | —    | mA              |
| Peak Output Current                       | $I_{o peak}$                | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | —                               | 2.2  | —    | A               |
| Temperature Coefficient of Output Voltage | $\Delta V_{out}/\Delta T_J$ | $I_{out}=5mA$ , $0^{\circ}C \leq T_J \leq 125^{\circ}C$                      | —                               | -1.8 | —    | mV/ $^{\circ}C$ |

**LM7809 ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

( $V_{in}=15V$ ,  $I_{out}=500mA$ ,  $0^{\circ}C \leq T_J \leq 125^{\circ}C$ ,  $C_{in}=0.33\mu F$ ,  $C_{out}=0.1\mu F$ ; unless otherwise specified.)

| Item                                      | Symbol                      | Test Conditions                                                              | min.                            | typ. | max. | unit            |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------|------|-----------------|
| Output Voltage                            | $V_{out}$                   | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | 8.82                            | 9    | 9.18 | V               |
|                                           |                             | $10.5V \leq V_{in} \leq 27V$ , $5mA \leq I_{out} \leq 1.0A$ , $P_D \leq 15W$ | 8.77                            | --   | 9.23 | V               |
| Line Regulation                           | $\Delta REG_{line}$         | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | $11.5V \leq V_{in} \leq 30V$    |      | 6    | 160 mV          |
|                                           |                             |                                                                              | $12V \leq V_{in} \leq 18V$      |      | 2.0  | 80 mV           |
| Load Regulation                           | $\Delta REG_{load}$         | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | $5mA \leq I_{out} \leq 1.5A$    |      | 12   | 160 mV          |
|                                           |                             |                                                                              | $250mA \leq I_{out} \leq 750mA$ |      | 4    | 80 mV           |
| Quiescent Current                         | $I_q$                       | $T_J=25^{\circ}C$ , $I_{out}=0$                                              | --                              | 4.3  | 1.0  | mA              |
| Quiescent Current Change                  | $\Delta I_q$                | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | $14.5V \leq V_{in} \leq 30V$    |      | --   | 0.5 mA          |
|                                           |                             |                                                                              | $5mA \leq I_{out} \leq 1.0A$    |      | --   | mA              |
| Output Noise Voltage                      | $V_n$                       | $T_a=25^{\circ}C$ , $10Hz \leq f \leq 100KHz$                                | --                              | 52   | --   | $\mu V$         |
| Ripple Rejection Ratio                    | RR                          | $f=120Hz$                                                                    | 55                              | 72   | --   | dB              |
| Voltage Drop                              | $V_{drop}$                  | $I_{out}=1.0A$ , $T_J=25^{\circ}C$                                           | --                              | 2.0  | --   | V               |
| Output Resistance                         | $R_{out}$                   | $f=1KHz$                                                                     | --                              | 16   | --   | m $\Omega$      |
| Output Short Circuit Current              | $I_{os}$                    | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | --                              | 450  | --   | mA              |
| Peak Output Current                       | $I_{o peak}$                | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | --                              | 2.2  | --   | A               |
| Temperature Coefficient of Output Voltage | $\Delta V_{out}/\Delta T_J$ | $I_{out}=5mA$ , $0^{\circ}C \leq T_J \leq 125^{\circ}C$                      | --                              | -1.8 | --   | mV/ $^{\circ}C$ |

**LM7810 ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

( $V_{in}=16V$ ,  $I_{out}=500mA$ ,  $0^{\circ}C \leq T_J \leq 125^{\circ}C$ ,  $C_{in}=0.33\mu F$ ,  $C_{out}=0.1\mu F$ ; unless otherwise specified.)

| Item                                      | Symbol                      | Test Conditions                                                              | min.                            | typ. | max.  | unit            |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------|-------|-----------------|
| Output Voltage                            | $V_{out}$                   | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | 9.8                             | 10   | 10.2  | V               |
|                                           |                             | $17.5V \leq V_{in} \leq 30V$ , $5mA \leq I_{out} \leq 1.0A$ , $P_D \leq 15W$ | 9.75                            | --   | 12.25 | V               |
| Line Regulation                           | $\Delta REG_{line}$         | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | $10.5V \leq V_{in} \leq 30V$    |      | 10    | 240 mV          |
|                                           |                             |                                                                              | $13V \leq V_{in} \leq 9V$       |      | 3.0   | 120 mV          |
| Load Regulation                           | $\Delta REG_{load}$         | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | $5mA \leq I_{out} \leq 1.3A$    |      | 12    | 240 mV          |
|                                           |                             |                                                                              | $250mA \leq I_{out} \leq 750mA$ |      | 4.0   | 120 mV          |
| Quiescent Current                         | $I_q$                       | $T_J=25^{\circ}C$ , $I_{out}=0$                                              | --                              | 4.3  | 8.0   | mA              |
| Quiescent Current Change                  | $\Delta I_q$                | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | $14.5V \leq V_{in} \leq 30V$    |      | --    | 1.0 mA          |
|                                           |                             |                                                                              | $5mA \leq I_{out} \leq 1.0A$    |      | --    | 0.5 mA          |
| Output Noise Voltage                      | $V_n$                       | $T_a=25^{\circ}C$ , $10Hz \leq f \leq 100KHz$                                | --                              | 52   | --    | $\mu V$         |
| Ripple Rejection Ratio                    | RR                          | $f=120Hz$                                                                    | 54                              | 72   | --    | dB              |
| Voltage Drop                              | $V_{drop}$                  | $I_{out}=1.0A$ , $T_J=25^{\circ}C$                                           | --                              | 2.0  | --    | V               |
| Output Resistance                         | $R_{out}$                   | $f=1KHz$                                                                     | --                              | 16   | --    | m $\Omega$      |
| Output Short Circuit Current              | $I_{os}$                    | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | --                              | 450  | --    | mA              |
| Peak Output Current                       | $I_{o peak}$                | $T_J=25^{\circ}C$                                                            | --                              | 2.2  | --    | A               |
| Temperature Coefficient of Output Voltage | $\Delta V_{out}/\Delta T_J$ | $I_{out}=5mA$ , $0^{\circ}C \leq T_J \leq 125^{\circ}C$                      | --                              | -1.8 | --    | mV/ $^{\circ}C$ |

**LM7812 ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

( $V_{in}=19V$ ,  $I_{out}=500mA$ ,  $0^{\circ}C \leq T_j \leq 125^{\circ}C$ ,  $C_{in}=0.33\mu F$ ,  $C_{out}=0.1\mu F$ ; unless otherwise specified.)

| Item                                      | Symbol                      | Test Conditions                                                              | min.  | typ. | max.  | unit            |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|-----------------|
| Output Voltage                            | $V_{out}$                   | $T_j=25^{\circ}C$                                                            | 11.76 | 12.0 | 12.24 | V               |
|                                           |                             | $14.5V \leq V_{in} \leq 27V$ , $5mA \leq I_{out} \leq 1.0A$ , $P_D \leq 15W$ | 11.66 | --   | 12.34 | V               |
| Line Regulation                           | $\Delta REG_{line}$         | $T_j=25^{\circ}C$                                                            |       |      |       |                 |
|                                           |                             | $14.5V \leq V_{in} \leq 30V$                                                 | --    | 10   | 240   | mV              |
| Load Regulation                           | $\Delta REG_{load}$         | $T_j=25^{\circ}C$                                                            |       |      |       |                 |
|                                           |                             | $5mA \leq I_{out} \leq 1.5A$                                                 | --    | 12   | 240   | mV              |
| Quiescent Current                         | $I_q$                       | $T_j=25^{\circ}C$ , $I_{out}=0$                                              | --    | 4.3  | 8.0   | mA              |
| Quiescent Current Change                  | $\Delta I_q$                | $T_j=25^{\circ}C$                                                            |       |      |       |                 |
|                                           |                             | $14.5V \leq V_{in} \leq 30V$                                                 | --    | --   | 1.0   | mA              |
| Output Noise Voltage                      | $V_n$                       | $T_a=25^{\circ}C$ , $10Hz \leq f \leq 100KHz$                                | --    | 75   | --    | $\mu V$         |
| Ripple Rejection Ratio                    | RR                          | $f=120Hz$                                                                    | 55    | 71   | --    | dB              |
| Voltage Drop                              | $V_{drop}$                  | $I_{out}=1.0A$ , $T_j=25^{\circ}C$                                           | --    | 2.0  | --    | V               |
| Output Resistance                         | $R_{out}$                   | $f=1KHz$                                                                     | --    | 18   | --    | $m\Omega$       |
| Output Short Circuit Current              | $I_{os}$                    | $T_j=25^{\circ}C$                                                            | --    | 330  | --    | mA              |
| Peak Output Current                       | $I_{o peak}$                | $T_j=25^{\circ}C$                                                            | --    | 2.2  | --    | A               |
| Temperature Coefficient of Output Voltage | $\Delta V_{out}/\Delta T_j$ | $I_{out}=5mA$ , $0^{\circ}C \leq T_j \leq 125^{\circ}C$                      | --    | -1.0 | --    | mV/ $^{\circ}C$ |

**LM7815 ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

( $V_{in}=23V$ ,  $I_{out}=500mA$ ,  $0^{\circ}C \leq T_j \leq 125^{\circ}C$ ,  $C_{in}=0.33\mu F$ ,  $C_{out}=0.1\mu F$ ; unless otherwise specified.)

| Item                                      | Symbol                      | Test Conditions                                                              | min.  | typ. | max.  | unit            |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|-----------------|
| Output Voltage                            | $V_{out}$                   | $T_j=25^{\circ}C$                                                            | 14.7  | 15.0 | 15.3  | V               |
|                                           |                             | $17.5V \leq V_{in} \leq 30V$ , $5mA \leq I_{out} \leq 1.0A$ , $P_D \leq 15W$ | 14.55 | --   | 15.45 | V               |
| Line Regulation                           | $\Delta REG_{line}$         | $T_j=25^{\circ}C$                                                            |       |      |       |                 |
|                                           |                             | $17.5V \leq V_{in} \leq 30V$                                                 | --    | 11   | 300   | mV              |
| Load Regulation                           | $\Delta REG_{load}$         | $T_j=25^{\circ}C$                                                            |       |      |       |                 |
|                                           |                             | $5mA \leq I_{out} \leq 1.5A$                                                 | --    | 12   | 300   | mV              |
| Quiescent Current                         | $I_q$                       | $T_j=25^{\circ}C$ , $I_{out}=0$                                              | --    | 4.4  | 8.0   | mA              |
| Quiescent Current Change                  | $\Delta I_q$                | $T_j=25^{\circ}C$                                                            |       |      |       |                 |
|                                           |                             | $17.5V \leq V_{in} \leq 30V$                                                 | --    | --   | 1.0   | mA              |
| Output Noise Voltage                      | $V_n$                       | $T_a=25^{\circ}C$ , $10Hz \leq f \leq 100KHz$                                | --    | 90   | --    | $\mu V$         |
| Ripple Rejection Ratio                    | RR                          | $f=120Hz$                                                                    | 54    | 70   | --    | dB              |
| Voltage Drop                              | $V_{drop}$                  | $I_{out}=1.0A$ , $T_j=25^{\circ}C$                                           | --    | 2.0  | --    | V               |
| Output Resistance                         | $R_{out}$                   | $f=1KHz$                                                                     | --    | 19   | --    | $m\Omega$       |
| Output Short Circuit Current              | $I_{os}$                    | $T_j=25^{\circ}C$                                                            | --    | 230  | --    | mA              |
| Peak Output Current                       | $I_{o peak}$                | $T_j=25^{\circ}C$                                                            | --    | 2.1  | --    | A               |
| Temperature Coefficient of Output Voltage | $\Delta V_{out}/\Delta T_j$ | $I_{out}=5mA$ , $0^{\circ}C \leq T_j \leq 125^{\circ}C$                      | --    | -1.0 | --    | mV/ $^{\circ}C$ |

**LM7818 ELECTRICAL CHARACTERISTICS**
*(V<sub>in</sub>=27V, I<sub>out</sub>=500mA, 0°C ≤ T<sub>j</sub> ≤ 125°C, C<sub>in</sub>=0.33μF, C<sub>out</sub>=0.1μF; unless otherwise specified.)*

| Item                                      | Symbol                               | Test Conditions                                                                    | min.  | typ. | max.  | unit  |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|-------|
| Output Voltage                            | V <sub>out</sub>                     | T <sub>j</sub> =25°C                                                               | 17.64 | 18.0 | 18.36 | V     |
|                                           |                                      | 21.0V ≤ V <sub>in</sub> ≤ 33V, 5mA ≤ I <sub>out</sub> ≤ 1.0A, P <sub>D</sub> ≤ 15W | 17.44 | —    | 18.56 | V     |
| Line Regulation                           | Δ V <sub>o line</sub>                | T <sub>j</sub> =25°C                                                               | —     | 15   | 360   | mV    |
|                                           |                                      | 21.0V ≤ V <sub>in</sub> ≤ 33V                                                      | —     | 5.0  | 180   | mV    |
| Load Regulation                           | Δ REG <sub>load</sub>                | T <sub>j</sub> =25°C                                                               | —     | 12   | 360   | mV    |
|                                           |                                      | 5mA ≤ I <sub>out</sub> ≤ 1.5A                                                      | —     | 4.0  | 180   | mV    |
| Quiescent Current                         | I <sub>q</sub>                       | T <sub>j</sub> =25°C, I <sub>out</sub> =0                                          | —     | 4.5  | 8.0   | mA    |
| Quiescent Current Change                  | Δ I <sub>q</sub>                     | 21.0V ≤ V <sub>in</sub> ≤ 33V                                                      | —     | —    | 1.0   | mA    |
|                                           |                                      | 5mA ≤ I <sub>out</sub> ≤ 1.0A                                                      | —     | —    | 0.5   | mA    |
| Output Noise Voltage                      | V <sub>n</sub>                       | T <sub>a</sub> =25°C, 10Hz ≤ f ≤ 100KHz                                            | —     | 110  | —     | μV    |
| Ripple Rejection Ratio                    | RR                                   | f=120Hz                                                                            | 53    | 69   | —     | dB    |
| Voltage Drop                              | V <sub>drop</sub>                    | I <sub>out</sub> =1.0A, T <sub>j</sub> =25°C                                       | —     | 2.0  | —     | V     |
| Output Resistance                         | R <sub>out</sub>                     | f=1KHz                                                                             | —     | 22   | —     | mΩ    |
| Output Short Circuit Current              | I <sub>os</sub>                      | T <sub>j</sub> =25°C                                                               | —     | 200  | —     | mA    |
| Peak Output Current                       | I <sub>o peak</sub>                  | T <sub>j</sub> =25°C                                                               | —     | 2.1  | —     | A     |
| Temperature Coefficient of Output Voltage | Δ V <sub>out</sub> /Δ T <sub>j</sub> | I <sub>out</sub> =5mA, 0°C ≤ T <sub>j</sub> ≤ 125°C                                | —     | -1.0 | —     | mV/°C |

**LM7824 ELECTRICAL CHARACTERISTICS**
*(V<sub>in</sub>=33V, I<sub>out</sub>=500mA, 0°C ≤ T<sub>j</sub> ≤ 125°C, C<sub>in</sub>=0.33μF, C<sub>out</sub>=0.1μF; unless otherwise specified.)*

| Item                                      | Symbol                               | Test Conditions                                                                    | min.  | typ. | max.  | unit  |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|-------|
| Output Voltage                            | V <sub>out</sub>                     | T <sub>j</sub> =25°C                                                               | 23.52 | 24.0 | 24.48 | V     |
|                                           |                                      | 27.0V ≤ V <sub>in</sub> ≤ 38V, 5mA ≤ I <sub>out</sub> ≤ 1.0A, P <sub>D</sub> ≤ 15W | 23.32 | —    | 24.68 | V     |
| Line Regulation                           | Δ V <sub>o line</sub>                | T <sub>j</sub> =25°C                                                               | —     | 18   | 480   | mV    |
|                                           |                                      | 27.0V ≤ V <sub>in</sub> ≤ 38V                                                      | —     | 6.0  | 240   | mV    |
| Load Regulation                           | Δ V <sub>o load</sub>                | T <sub>j</sub> =25°C                                                               | —     | 12   | 480   | mV    |
|                                           |                                      | 5mA ≤ I <sub>out</sub> ≤ 1.5A                                                      | —     | 4.0  | 240   | mV    |
| Quiescent Current                         | I <sub>q</sub>                       | T <sub>j</sub> =25°C, I <sub>out</sub> =0                                          | —     | 4.6  | 8.0   | mA    |
| Quiescent Current Change                  | Δ I <sub>q</sub>                     | 27.0V ≤ V <sub>in</sub> ≤ 38V                                                      | —     | —    | 1.0   | mA    |
|                                           |                                      | 5mA ≤ I <sub>out</sub> ≤ 1.0A                                                      | —     | —    | 0.5   | mA    |
| Output Noise Voltage                      | V <sub>n</sub>                       | T <sub>a</sub> =25°C, 10Hz ≤ f ≤ 100KHz                                            | —     | 170  | —     | μV    |
| Ripple Rejection Ratio                    | RR                                   | f=120Hz                                                                            | 50    | 66   | —     | dB    |
| Voltage Drop                              | V <sub>drop</sub>                    | I <sub>out</sub> =1.0A, T <sub>j</sub> =25°C                                       | —     | 2.0  | —     | V     |
| Output Resistance                         | R <sub>out</sub>                     | f=1KHz                                                                             | —     | 28   | —     | mΩ    |
| Output Short Circuit Current              | I <sub>os</sub>                      | T <sub>j</sub> =25°C                                                               | —     | 150  | —     | mA    |
| Peak Output Current                       | I <sub>o peak</sub>                  | T <sub>j</sub> =25°C                                                               | —     | 2.1  | —     | A     |
| Temperature Coefficient of Output Voltage | Δ V <sub>out</sub> /Δ T <sub>j</sub> | I <sub>out</sub> =5mA, 0°C ≤ T <sub>j</sub> ≤ 125°C                                | —     | -1.5 | —     | mV/°C |



FIGURE 1 - WORST CASE POWER DISSIPATION  
VERSUS AMBIENT TEMPERATURE (Case 221A)

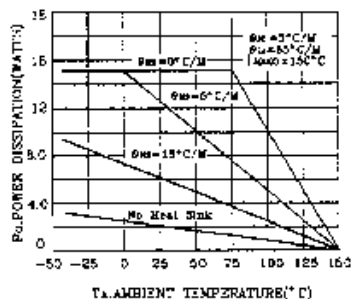


FIGURE 2 - WORST CASE POWER DISSIPATION  
VERSUS AMBIENT TEMPERATURE (Case 1)

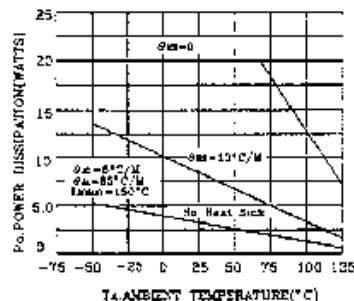


FIGURE 3 - INPUT-OUTPUT DIFFERENTIAL AS A  
FUNCTION OF JUNCTION TEMPERATURE

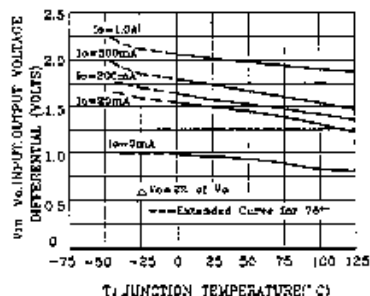


FIGURE 4 - INPUT-OUTPUT DIFFERENTIAL AS A  
FUNCTION OF JUNCTION TEMPERATURE

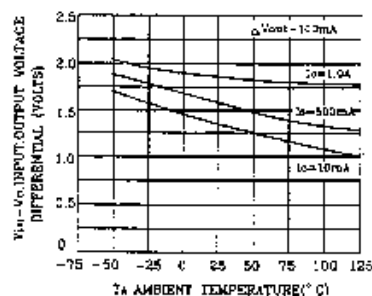


FIGURE 5 - PEAK OUTPUT CURRENT AS A  
FUNCTION OF INPUT-OUTPUT DIFFERENTIAL  
VOLTAGE

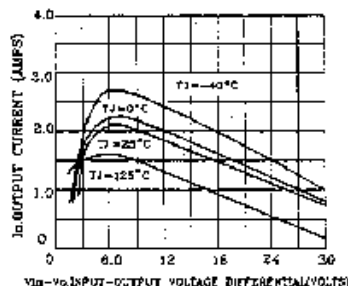


FIGURE 6 - PEAK OUTPUT CURRENT AS A  
FUNCTION OF INPUT-OUTPUT DIFFERENTIAL  
VOLTAGE

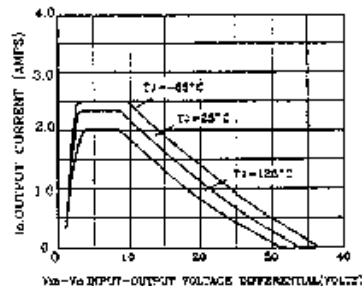


FIGURE 7 - RIPPLE REJECTION AS A FUNCTION OF OUTPUT VOLTAGE

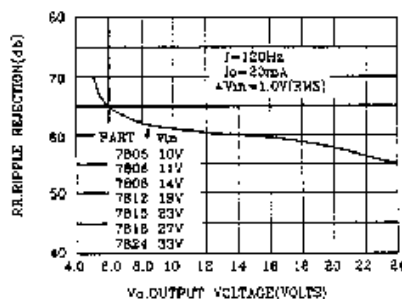


FIGURE 8 - RIPPLE REJECTION AS A FUNCTION OF FREQUENCY

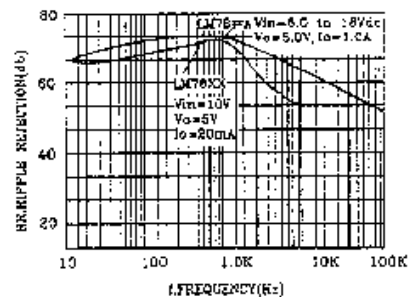


FIGURE 9 - OUTPUT VOLTAGE AS A FUNCTION OF JUNCTION TEMPERATURE

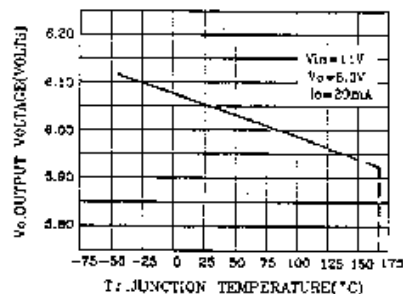


FIGURE 10 - OUTPUT IMPEDANCE AS A FUNCTION OF OUTPUT VOLTAGE

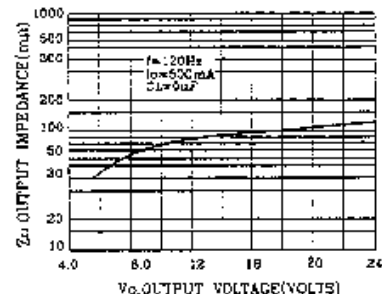


FIGURE 11 - QUIESCENT CURRENT AS A FUNCTION OF TEMPERATURE

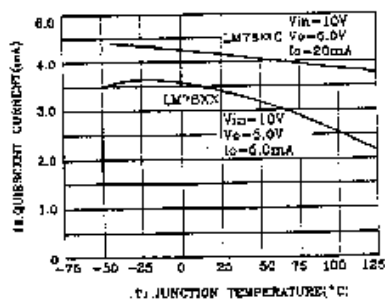
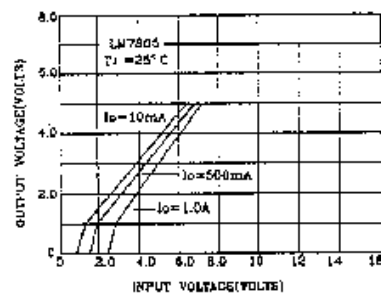


FIGURE 12 - DROPOUT CHARACTERISTICS





**20A UBEC 30A UBEC**

## **USER MANUAL**

### **Dear customers:**

Thank you for using the smart power electric speed controller (ESC) for brushless motor designed and produced by HobbyKing.com. Wrong use and operation may cause personal injuries and damages on the equipment due to the strong power at the starting of the product. We strongly recommend customers to read the specification carefully before using the product and operate the product strictly in accordance with the operating provisions. We assume no responsibilities generated from the application of the product, including but not limited to liabilities for damage of incidental losses or indirect losses. Meanwhile, we assume no responsibilities generated from the disassembly and modification by users themselves and assume no responsibilities caused by products from the third party.

We have the right to alter products including appearance, performance parameter and operating requirement without advanced notice. We make no guarantee, declaration or promise on whether the product is suitable for specific purpose of users.

### **I. The main properties of electric speed controller for brushless motor**

- Use powerful and high-performance MCU processor. The users can set function of use according to their requirements. It fully reflects the smart property of our products as a unique advantage.
- Support unlimited rotate speed of brushless motor
- Support the function of fixed speed
- Delicate circuit design with strong anti-interference
- The starting mode can be set. The response speed of throttle is very quickly and with very stable linear of speed regulation. It can be used in fixed wing aircraft and helicopter
- Threshold values of low-voltage protection can be set.
- With internal SBEC, the operating power to start steering engine is strong and the power dissipation is small.
- Multi protection function: protection for abnormal input voltage/ protection for low battery/ protection for overheat/protection of lowering power when lost of signals from throttle
- Good safety performance under energization: the motor will not start at the time of power on regardless of the location of pull rod of throttle in controller.
- Protection for overheat: the output power will lesson to half when the temperature reaches 100°C during the operation of ESC. The output power will automatic recover when the temperature is under 100°C
- Supports with operation setting for all controller and setting of programming panels
- Set alarm sound. And judge the working situation after power on.
- The company has completed intellectual property on the product. The product can be continually updated and upgraded. The product can be made to customers' requirements.

The product standard of ESC

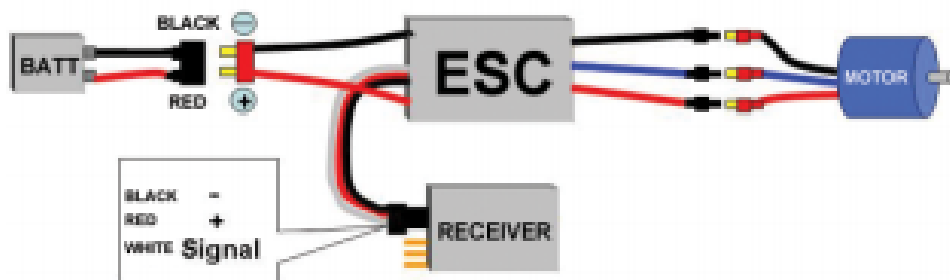
| Standard   | (A) sustained current | (10s) (A) max instantaneous current | (V/A) Output BEC | BEC mode  | Number of battery/lithium battery | Number of battery/nickel-hydrogen battery | mm Size(width*length*height) | g weight |
|------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------|-----------|-----------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|----------|
| HK20A UBEC | 20A                   | 25A                                 | 5.5V/3A-1A       | SBEC/UBEC | 2-4Lipo                           | 5-12NC                                    | 54*26*11                     | 30       |
| HK3A UBEC  | 30A                   | 40A                                 | 5.5V/3A-1A       | SBEC/UBEC | 2-4Lipo                           | 5-12NC                                    | 54*26*11                     | 32       |

**Notice:**

- 1) The ESC with SBEC supply steering engine with switching power. The output voltage is 5.5V. The load current of steering engine is 4A. At the moment of 2 seconds can reach 8A.
- 2) The ESC with UBEC supply steering engine with linear power. The output voltage is 5.5v. The load current is 1A.
- 3) OPTO means that there is no BEC inside ESC. The steering engine and receiver shall be supplied with power separately.
- 4) Customized BEC can be made according to customers' requirements.
- 5) Customized ESC can be made according to customers' requirements.

**II. The introduction of the connection in the ESC**

In order to avoid short circuit and leakage, the joint are connected by thermal shrinkable pipe to ensure insulation.



Battery Pack Black Red White Motor

**III. The function of electric speed controller for brushless motor**

1. Reset to factory default
2. Battery types set(Lipo or NiMh/NiCd)
3. Brake set (yes/no)

- 
4. Threshold set of protection for low voltage (set a protective value for low voltage)
  5. Motor entrance angle set (improve the service efficiency of ESC and the stability in the starting)
  6. Accelerated startup set (used in precise gear box and application of helicopter)
  7. Helicopter mode (used in application of helicopter)
  8. Steering motor (clockwise/anticlockwise)
  9. Operating frequency set
  10. Protection mode under low voltage (reduces power or halts immediately)

## **VI. The operation steps of programming in ESC for brushless motor.**

Push the pull rod of throttle in the ESC to the highest position to make the ESC enter the setting mode and then turn on the ESC.

Remark: the ESC enters the setting mode when the pull rod of throttle in the ESC is pushed to the highest position; the ESC enters the working mode when the pull rod of throttle in the ESC is pushed to the lowest position.

1) Connect the battery pack to the ESC. After two seconds, a beep shows that the ESC enters the setting mode. The menu of setting mode is a cycle model. Each function corresponds to one corresponding musical tone. Each musical tone will ring out for four times continuously. During the four periods when music rings, push the pull rod of throttle in the ESC to the lowest position. Then the motor will give out a beep to inform that corresponding parameters have been stored, and the ESC enters the working mode.

2) Repeat the above operation to set various functions you need.

Remark: Can also set with programming panels ( optional accessories ) . Refer to specification of programming panels for setting method.

### **1. Brake: turn on/turn off**

Turn on: the propeller stops immediately when the throttle works under the smallest position.

Turn off: the propeller stops naturally when the throttle works under the smallest position.

### **2. Battery types: LiPo or NiCd/NiMh**

NiCd/NiMh- set protection point for NiCad/NiMh.

Lipo-set protection point for Lipo and detect numbers of battery automatically in the battery pack.

Remark: the choice of NiCad/NiMh battery will make the ESC automatically set the cutoff value of voltage at 65% of factory defaults. The cutoff value can be modified through the function of protection for low voltage in case of changes. Once the battery pack of NiCad/NiMh connects to the power, the ESC will read its initial voltage. The voltage will used as a reference value for cutoff value of voltage.

### **3. Protection function of low voltage: low/middle/high**

1) In case of Ni-xx battery pack: the cutoff value of voltage is 50%/65%/65% of the initial voltage of battery pack under low/middle/high threshold value.

2) In case of Li-xx battery pack: the number of batteries can be calculated automatically. Users need not to set anything except the types of battery. The ESC provides three optional gears for protection point of low voltage: low(2.8V)/middle(3.0V)/high(3.2V)

For example: the protection cutoff voltage for low voltage is 11.2V as low /12.0V as middle/12.8V as high in case of Li-po battery pack with four batteries and voltage at 14.8V.

### **4. Recover to factory default setting.**

1) The factory default setting of ESC:

---

2) The brake: off

3) The types of battery: Lipo battery with automatic detection.

4) The cutoff value under low voltage: middle (3.0V/85%)

5) The angle of entrance in motor: automatic

6) Setting for accelerated startup: smooth

7) The setting Mode for helicopter: off

8) The frequency of working: 8kHz

9) Protection mode under low voltage: reduce power

#### **5. The angle of entrance in motor: automatic/low/high**

Automatic-the ESC detect the most suitable angle of entrance in motor automatically.

Low (7-22 degree) – suitable for the setting of most motors with inner rotor

High (22-30 degree)-suitable for the setting of most motors with outer rotor and 6 poles or more than poles

Under most cases, the automatic angle of entrance is suitable for all motors. However, in order to increase efficiency, we recommend using low angle of entrance in motors with 2 poles (generally inner rotor), and using high angle of entrance in motors with 6 and more than 6 poles (generally outer rotor). We can set a high angle of entrance for motors with higher rotate speed. Some motors need special angle of entrance. We recommend using the angle of entrance recommended by motor producers or automatic detected angle of entrance in case of uncertainty.

Remark: please debug the motor on the ground after successfully altering the angle of entrance in motor.

Setting for accelerated startup: provide rapid accelerated start up with linear throttle response.

Ultra smooth startup: the lag time of throttle response between the starting and highest speed is 1.5 seconds. The setting mode can prevent the precision gear/gearing dropping under momentary load. The setting mode is recommended to use in fixed wing model with gear box or helicopter.

Smooth startup: the lag time of throttle response between the starting and highest speed is 1 second. The setting mode is recommended to use in fixed wing model with gear box or helicopter.

Accelerated startup: there is no lag time of throttle response between the starting and highest speed. The setting mode is recommended to use in fixed wing model with direct drive.

#### **6. The Mode for helicopter: (use in application of helicopter)**

Turn off the helicopter

Helicopter 1: the lag time of throttle response between the starting and highest speed is 5 seconds. However, if the throttle is turned off after startup, the next startup will commence in common mode.

Helicopter 1: the lag time of throttle response between the starting and highest speed is 15 seconds. However, if the throttle is turned off after startup, the next startup will commence in common mode.

Remark: once working under mode for helicopter, the brake and types of protection under low voltage will be reset automatically to mode of no brake and reduce power mode separately regardless of previous setting of ESC.

#### **7. Steering motor (clockwise/anticlockwise)**

In most cases, the clockwise and anticlockwise rotation of motor can be realized by exchanging any two lines among the three output lines in the ESC connected to the motor. The direction of rotation can be changed by altering the setting value on the ESC in case that the wire connected to motor has been directly welded on the ESC.

#### **8. Operating frequency: 8kHz / 16kHz**

8 kHz-the Operating frequency for motor with 2 poles, for example inner rotor

16 kHz-the Operating frequency for motor with poles more than 2, for example outer rotor

Although the operating frequency of 16 kHz can provide strong power for fixed wing or helicopter, the default setting is 8 kHz for there are louder RF noise under the operating frequency of 16 kHz.

#### 9. Protection mode under low voltage: reduce power/ halt immediately

Reduce power- the ESC will reduce the output power of motor when reaches default protection threshold for low voltage (recommend)

Halt immediately-the ESC will cut off the output power of motor when reaches default protection threshold for low voltage

### V. The order and introduction of circle menu under programming mode

- Turn on ESC- push the throttle to the highest position-connect the ESC to battery- wait two second-enter programming mode

After enter programming mode, the following beeps will give out in accordance with the following circuit. After certain warning tone, push the throttle to the lowest position during the four beeps.

Confirm and reserve the setting.

| The introduction for the setting of programming                               |                                             |                             |                     |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| The setting of programming 1 (the five following warning tone is as follows.) |                                             |                             |                     |
| A= - beep-                                                                    |                                             | short sound                 |                     |
| B= beep-beep-beep                                                             |                                             | 3 three continuing sounds   |                     |
| C= ~beep                                                                      |                                             | gradual changing sound+beep |                     |
| D= beep^                                                                      |                                             | low sound                   |                     |
| E= beep--                                                                     |                                             | long sound                  |                     |
| music1                                                                        | throttle                                    |                             | A-A-A-A             |
| music2                                                                        | brake                                       |                             | B-B-B-B             |
| music3                                                                        | types of battery                            | nickel-hydrogen battery     | C-C-C-C             |
| music4                                                                        |                                             | lithium battery             | D-D-D-D             |
| music5                                                                        | protection threshold for low voltage        | low                         | E-E-E-E             |
| music6                                                                        |                                             | middle                      | AA-AA-AA-AA         |
| music7                                                                        |                                             | high                        | BB-BB-BB-BB         |
| music8                                                                        | Recover to factory default setting          |                             | CC-CC-CC-CC         |
| music9                                                                        | Angle of entrance                           | Automatic                   | DD-DD-DD-DD         |
| music10                                                                       |                                             | Low                         | EE-EE-EE-EE         |
| music11                                                                       |                                             | High                        | AAA-AAA-AAA-AAA     |
| music12                                                                       | Startup of motor                            | Ultra smooth                | BBB-BBB-BBB-BBB     |
| music13                                                                       |                                             | Smooth                      | CCC-CCC-CCC-CCC     |
| music14                                                                       |                                             | Accelerated startup         | DDD-DDD-DDD-DDD     |
| music15                                                                       | Mode for helicopter                         | Turn off                    | EEE-EEE-EEE-EEE     |
| music16                                                                       |                                             | The helicopter mode 1       | AAAA-AAAA-AAAA-AAAA |
| music17                                                                       |                                             | The helicopter mode 2       | BBBB-BBBB-BBBB-BBBB |
| music18                                                                       | The pros and cons setting of motor rotation |                             | CCCC-CCCC-CCCC-CCCC |

|         |                                   |               |                     |
|---------|-----------------------------------|---------------|---------------------|
| music19 | PWM frequency of motor            | 8K            | DDDD-DDDD-DDDD-DDDD |
| music20 |                                   | 16K           | EEEE-EEEE-EEEE-EEEE |
| music21 | Protection mode under low voltage | Reduce power  | AD-AD-AD-AD         |
| music22 |                                   | cutoff output | AE-AE-AE-AE         |

• The warning tone: the warning tone is set as audible sound to help users judge abnormal condition after turn on the power.

1. Fail to enter working mode after turn on the power: the routine of throttle has not been set yet.
2. Continuing beeps: the pull rod of throttle is not in the lowest position
3. There is a short pause after a beep: the ESC can not detect normal throttle signals from receiver.
4. There is a pause of one second after a beep: the voltage of battery pack is out of acceptable limit (once the battery is connected, the ESC will carry out a self-checking and check the voltage of battery.)

#### VI. The smart protection functions of ESC.

| The introduction of the protection function in the ESC for brushless motor |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Types of protection                                                        | Descriptions of protection                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Protection for startup                                                     | If the motor fails to startup normally in two seconds after push the throttle to start, the ESC will cut off the motor. The throttle shall be reset to commence a restart. Possible reasons: there is a disconnection or poor contact in wiring between the ESC and motor. The propeller is stemmed by other objects. The speed reduction gear is badly blocked.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Protection for temperature                                                 | When the working temperature in the ESC is higher than 100°C, the ESC will reduce the output power automatically to commence protection, but will reduce the output power to 40% of full power to reserve some power for motor and avoid crash landing instead of turning off all output power. The ESC will recover to max power as the temperature falls.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Protection for lost of throttle signals                                    | The ESC will reduce the output power to motor when the ESC detect that there are 2 seconds' lost of throttle signals. If there another 2 seconds' lost of throttle signals, the ESC will cut off motor automatically. If the throttle signals recover during the reduction of output power of motor, the ESC will recover control of throttle at once. In this method, in the case of momentary lost of signals (within 2 seconds), the ESC will not commence the protection of throttle. Only when the control signals have been lost for a long time, the ESC will commence protection. However, the ECS will reduce the output power gradually instead of cutting off output power immediately so that the players will have certain period to rescue the machine. It has both safety and practicability. |

#### VII. The routine of throttle shall be set at the first time turn on the ESC.

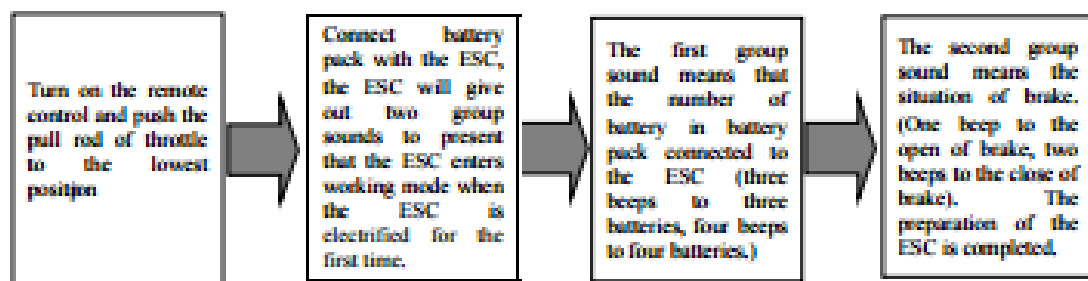
The feature of HobbyKing ESC is to set best routine of throttle according to different transmitters. The ESC can obtain most stable throttle linear response through the total routine of throttle in transmitters. The objective is let the ESC to obtain and remember the output signals of throttle in transmitters. The operation needs to be carried for one time. Please repeat the operation when change transmitters.

Notice: must to check carefully whether polarities of all connector assembly are correct and whether the installation is firm before connect the battery pack during the using to avoid damages to the ESC due to incorrect connection between polarities or short out.

The operation when use the ESC for the first time is as follows:

- The normal startup procedure of the ESC is as follows:





Remark: if the motor suddenly stops when your model airplane are flying, you shall immediately push the pull rod of throttle to the lowest position and then push to the high position. Then the motor will restart. You shall land the model airplane immediately with throttle controlled with a lower position.

Please pay attention to the following safety information when using.

- Never disassemble any electro components in the ESC by yourself, or permanent damages or lost of information will occur.
- Check the setting of receiver. Do not install propeller or small driving gear on motor if you haven't confirm that the setting of receiver is correct when test the ESC and motor for the first time.
- Do not use cracked or broken battery pack.
- Do not use battery pack easily get overheat.
- Do not use short-cut battery.
- Do not use cable insulation material against standards.
- Do not use cable connector against standards.
- The number of battery or servo system shall not exceed the rules for ESC.
- The voltage of battery shall not exceed the scope of working voltage of ESC.
- Pay attention to the polarities of battery. Wrong polarities will damage the ESC.
- Be sure that the ESC will not use in manned craft or other manned machines.
- Do not place the ESC in moist or over exposure.
- Do not take out battery when the motor is working, for the generated large peak current will damage the ESC.
- Do not pack anything outside the ESC. Install the ESC in places with good ventilation and heat dissipation as far as possible.

### VIII. Handling of common problems

| Problems                                                                                                                                                                      | Possible reasons                                                                      | Solutions                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| After power on, the motor fails to work and there is no music. The servo system fails to work and switch on.                                                                  | There is a poor contact between battery pack and ESC.<br>The power is off.            | Clean the plugs again or change plugs. Check and confirm the polarities of wiring.                                                                                             |
|                                                                                                                                                                               | The polarities of connection between receiver and signal wires of ESC are wrong       | Check the signal wire to ensure the polarities are correct.                                                                                                                    |
|                                                                                                                                                                               | The welding is not firm so a poor contact easy happens.                               | Weld the connecting line for the second time.                                                                                                                                  |
|                                                                                                                                                                               | The wiring polarities of batteries are wrong.                                         | Check the battery pack and exchange battery pack with full voltage in accordance with standards.                                                                               |
|                                                                                                                                                                               | Other quality problems in ESC                                                         | Change ESC                                                                                                                                                                     |
| After power on, there is sound that ESC automatically check the number of batteries, but the motor fails to work.                                                             | The ESC fails to set routine of throttle.                                             | Reset the routine of throttle.                                                                                                                                                 |
| The ESC work successfully, but motor fails to work. There is no music.<br><br>After power on of ESC ,motor fails to work and gives out warning tone(two bees and short pause) | There is a poor contact or welding between ESC and motor.                             | Check the end of connector or change connector or weld the wiring of motor again.                                                                                              |
|                                                                                                                                                                               | Bad motor                                                                             | Change motor                                                                                                                                                                   |
|                                                                                                                                                                               | Protection for low voltage in ESC. The voltage of battery is out of acceptable limit. | Check the voltage of battery group, change with battery group of full voltage.                                                                                                 |
| After power on, motor fails to work but gives out warning tone(one beep and short pause)                                                                                      | There is no output signal of throttle in receiver.                                    | Check and confirm the connection between signal wire and throttle in receiver is correct.<br><br>Check the transmitters and receivers to ensure that there are output signals. |
| After power on, motor fails to work and gives out continuing beeps                                                                                                            | The pull rod of throttle is not in the lowest position                                | Push the pull rod of throttle to the lowest position and reset the routine of throttle.                                                                                        |
| After power on, motor fails to work and gives out two long beeps and then two short beeps                                                                                     | ESC enters programming mode due to wrong pros and cons setting of throttle channel.   | Adjust the pros and cons setting of throttle channel according to the specification of remote control.                                                                         |

|                                    |                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| The motor is in a inverted running | The order of wiring between motor and ESC is wrong                                                                                     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alter any two connection line among three connection line between ESC and motor</li> <li>2. Change direction by changing the rotation setting of motor directly with remote control or programming panels.</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| The motor stops in the flying.     | The voltage of battery is lower than default protection threshold for low voltage, and the protection mode for low voltage is cut off. | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Set the protection threshold for low voltage correctly. Fly with battery of full voltage. The protection mode for low voltage is set in mode of reduces power (default mode). Please land your model airplane in time if you find reduction of power during the flying.</li> <li>2. Control the model airplane flying in the scope of remote control</li> <li>3. Pay attention to the voltage of battery in remote control. Please land the model airplane in time if there is large reduction in voltage.</li> </ol> |
|                                    | Lost of throttle signals                                                                                                               | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Check the operation of remote control is correct.</li> <li>2. Check if the remote control is suitable to receiver.</li> <li>3. Please try restarting to recover normal operation if there is strong electromagnetic interference in the operating environment. If the problem occurs again and again, please change flying site for there is too strong interference from outside environment in this flying site.</li> </ol>                                                                                         |
|                                    | Poor contact in wiring.                                                                                                                | Check the connection between plug of battery pack, output line of battery and connection line of motor is reliable.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

# NEO-6 series

## Versatile u-blox 6 GPS modules

GPS

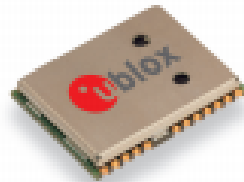
locate, communicate, accelerate

### Highlights

- UART, USB, DDC (PC compliant) and SPI interfaces
- Available in Crystal and TCXO versions
- Onboard RTC crystal for faster warm and hot starts
- 1.8 V and 3.0 V variants

### Features

- u-blox 6 position engine:
  - Navigate down to -162 dBm and -148 dBm coldstart
  - Faster acquisition with AssistNow Autonomous
  - Configurable power management
  - Hybrid GPS/SBAS engine (WAAS, EGNOS, MSAS)
  - Anti-jamming technology
- Simple integration with u-blox wireless modules
- A-GPS: AssistNow Online and AssistNow Offline services, OMA SUPL compliant
- Backward compatible (hardware and firmware); easy migration from NEO-5 family or NEO-4S
- LCC package for reliable and cost effective manufacturing
- Compatible with u-blox GPS Solution for Android
- Based on GPS chips qualified according to AEC-Q100
- Manufactured in ISO/TS 16949 certified production sites
- Qualified according to ISO 16750



NEO-6:  
12.2 x 16.0 x 2.4 mm

### Product description

The NEO-6 module series brings the high performance of the u-blox 6 position engine to the miniature NEO form factor. u-blox 6 has been designed with low power consumption and low costs in mind. Intelligent power management is a breakthrough for low-power applications. These receivers combine a high level of integration capability with flexible connectivity options in a small package. This makes them perfectly suited for mass-market end products with strict size and cost requirements. The DDC interface provides connectivity and enables synergies with u-blox L2DM and USA wireless modules.

All NEO-6 modules are manufactured in ISO/TS 16949 certified sites. Each module is tested and inspected during production. The modules are qualified according to ISO 16750 - Environmental conditions and electrical testing for electrical and electronic equipment for road vehicles.

### Product selector

| Model  | Type           |                    | Supply             | Interfaces     |               |               |      | Features |     |                    |                                   |            |             |                                  |                    |           |                                 |
|--------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|---------------|---------------|------|----------|-----|--------------------|-----------------------------------|------------|-------------|----------------------------------|--------------------|-----------|---------------------------------|
|        | Standalone GPS | Standalone GLONASS | Timing & Base Data | Dead Reckoning | 1.8 V - 2.0 V | 2.7 V - 3.6 V | UART | USB      | SPI | DDC (PC compliant) | Programmable<br># flash HW update | Oscillator | RTC crystal | Antenna supply<br>and supervisor | Configuration pins | Timepulse | External interrupt /<br>Wake-up |
| NEO-6G | •              |                    |                    |                | •             |               | •    | •        | •   | •                  |                                   | T          | •           | •                                | •                  | •         | •                               |
| NEO-6Q | •              |                    |                    |                |               |               | •    | •        | •   | •                  |                                   | T          | •           | •                                | •                  | •         | •                               |
| NEO-6M | •              |                    |                    |                |               |               | •    | •        | •   | •                  |                                   | C          | •           | •                                | •                  | •         | •                               |

• requires external components and integration on application processor

C = Crystal / T = TCXO



## Receiver performance data

|                          |                                                                          |           |          |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|----------|
| Receiver type            | 50-channel u-blox 6 engine<br>GPS L1 C/A code<br>SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS |           |          |
| Navigation update rate   | up to 5 Hz                                                               |           |          |
| Accuracy <sup>1</sup>    | Position                                                                 | 2.5 m CEP |          |
|                          | SBAS                                                                     | 2.0 m CEP |          |
| Acquisition <sup>2</sup> |                                                                          | NEO-6GQ   | NEO-6M   |
|                          | Cold start:                                                              | 26 s      | 27 s     |
|                          | Aided start <sup>3</sup> :                                               | 1 s       | < 2 s    |
|                          | Hot start:                                                               | 1 s       | 1 s      |
| Sensitivity <sup>4</sup> |                                                                          | NEO-6GQ   | NEO-6M   |
|                          | Tracking:                                                                | -162 dBm  | -161 dBm |
|                          | Cold start:                                                              | -148 dBm  | -147 dBm |
|                          | Hot start:                                                               | -157 dBm  | -156 dBm |

<sup>1</sup> 25 to 30 -150 dBm

<sup>2</sup> Dependent on fading data extension speed and latency

<sup>3</sup> Demonstrated with a good active antenna

## Electrical data

|                    |                                                                                                                                           |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Power supply       | 2.7 V – 3.6 V (NEO-6Q/6M)<br>1.75 V – 2.0 V (NEO-6G)                                                                                      |
| Power consumption  | 111 mW @ 3.0 V (continuous)<br>33 mW @ 3.0 V Power Save Mode (1 Hz)<br>68 mW @ 1.8 V (continuous)<br>22 mW @ 1.8 V Power Save Mode (1 Hz) |
| Backup power       | 1.4 V – 3.6 V, 22 µA                                                                                                                      |
| Supported antennas | Active and passive                                                                                                                        |

## Interfaces

|                   |                                                                                        |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Serial interfaces | 1 UART<br>1 USB V2.0 full speed 12 MB/s<br>1 DDC (I <sup>2</sup> C compliant)<br>1 SPI |
| Digital I/O       | Configurable timepulse<br>1 EXTINT input for Wakeup                                    |
| Serial and I/O    | Voltages 2.7 – 3.6 V (NEO-6Q/6M)<br>1.75 – 2.0 V (NEO-6G)                              |
| Timepulse         | Configurable 0.25 Hz to 1 kHz                                                          |
| Protocols         | NMEA, UBX binary, RTCM                                                                 |

### Legal notice

u-blox reserves all rights in this document and the information contained therein. Product names, logos and designs described herein may be trade dress or part of copyright material and are hereby acknowledged. Any use, modification or disclosure to third parties of this document or any part thereof without the express permission of u-blox is strictly prohibited.

The information contained herein is provided "as is", the accuracy of any third party's interpretation is made in relation to the accuracy, reliability, fitness for a particular purpose or nature of this document. This document may be revised or withdrawn at any time. For most recent documents, please visit [www.u-blox.com](http://www.u-blox.com).

Copyright © 2012, u-blox AG

Specification applies to V7

## Package

24 pin LCC (Leadless Chip Carrier) 12.2 x 16.0 x 2.4 mm, 1.6 g  
Pinout



## Environmental data, quality & reliability

Operating temp. -40° C to 85° C

Storage temp. -40° C to 85° C

RoHS compliant (lead-free)

Qualification according to ISO 16750

Manufactured in ISO/TS 16949 certified production sites

## Support products

u-blox 6 Evaluation Kit

Easy-to-use kits to get familiar with u-blox 6 positioning technology, evaluate functionality, and visualize GPS performance.

EVK-6H: u-blox 6 Evaluation Kit with TCXO, suitable for NEO-6G, NEO-6Q

EVK-6P: u-blox 6 Evaluation Kit with crystal, suitable for NEO-6M

## Ordering information

|          |                                                    |
|----------|----------------------------------------------------|
| NEO-6G-0 | u-blox 6 GPS Module, 1.8V, TCXO, 12x16mm, 250 pins |
| NEO-6M-0 | u-blox 6 GPS Module, 12x16mm, 250 pins             |
| NEO-6Q-0 | u-blox 6 GPS Module, TCXO, 12x16mm, 250 pins       |

Available as samples and tape on reel (250 pieces)

## Contact us

HQ Switzerland  
+41 44 722 7444  
[info@u-blox.com](mailto:info@u-blox.com)

EMEA  
+41 44 722 7444  
[info@u-blox.com](mailto:info@u-blox.com)

Americas  
+1 703 463 2180  
[info\\_us@u-blox.com](mailto:info_us@u-blox.com)

APAC – Singapore  
+65 6734 2811  
[info\\_ap@u-blox.com](mailto:info_ap@u-blox.com)

China  
+86 10 68 133 545  
[info\\_cn@u-blox.com](mailto:info_cn@u-blox.com)

Japan  
+81 3 5775 3850  
[info\\_jp@u-blox.com](mailto:info_jp@u-blox.com)

Korea  
+82 2 542 0861  
[info\\_kr@u-blox.com](mailto:info_kr@u-blox.com)

Taiwan  
+886 2 2657 1090  
[info\\_tw@u-blox.com](mailto:info_tw@u-blox.com)

## GP2Y0D815Z0F

Distance Measuring Sensor Unit  
Digital output (150 mm) type



### ■Description

GP2Y0D815Z0F is distance measuring sensor unit, composed of an integrated combination of PSD (position sensitive detector), IRED (infrared emitting diode) and signal processing circuit.

The variety of the reflectivity of the object, the environmental temperature and the operating duration are not influenced easily to the distance detection because of adopting the triangulation method.

The output voltage of this sensor stays high in case an object exists in the specified distance range. So this sensor can also be used as proximity sensor.

### ■Agency approvals/Compliance

1. Compliant with RoHS directive (2002/95/EC)

### ■Applications

1. Touchless switch  
(Sanitary equipment, Control of illumination, etc.)
2. Robot cleaner

### ■Features

1. Digital output type
2. Short distance type  
Detecting distance : Typ. 150 mm
3. Low profile  
Package size : 13.6×7×7.95 mm
4. Consumption current : Typ. 5 mA
5. Battery drive compatible  
Supply voltage : 2.7 to 6.2 V
6. Sunlight tolerance
7. Add Vin terminal, and an external transistor of Vcc line is unnecessary at intermittent operating.

Notice The content of data sheet is subject to change without prior notice.  
In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that may occur in equipment using any SHARP devices shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest device specification sheets before using any SHARP device.







## ■Electro-optical Characteristics

(Ta=25°C, Vcc=5V)

| Parameter                       | Symbol | Conditions                   | MIN.    | TYP. | MAX. | Unit |
|---------------------------------|--------|------------------------------|---------|------|------|------|
| Output terminal voltage         | VoH    | Output voltage at high level | Vcc-0.6 | •    | •    | V    |
|                                 | VoL    | Output voltage at low level  | •       | •    | 0.6  | V    |
| Output distance characteristics | Vo     | (*) (*)                      | 120     | 150  | 220  | mm   |
| Average supply current          | Icc 1  | Vcc=5V Vin=5V<br>R1=4.3Ω (*) | •       | 5    | 6.5  | mA   |
| Average supply current          | Icc 2  | Vcc=5V Vin=5V<br>R1=4.3Ω (*) | •       | 9    | 10.5 | mA   |
| Stand-by supply current         | Icc 3  | Vcc=5V Vin=0V                | •       | 5    | 8    | μA   |

※ L : Distance to reflective object

(\*)1 Using reflective object : White paper (Made by Kodak Co., Ltd. gray cards

R-27•white face, reflectance ; 90%)

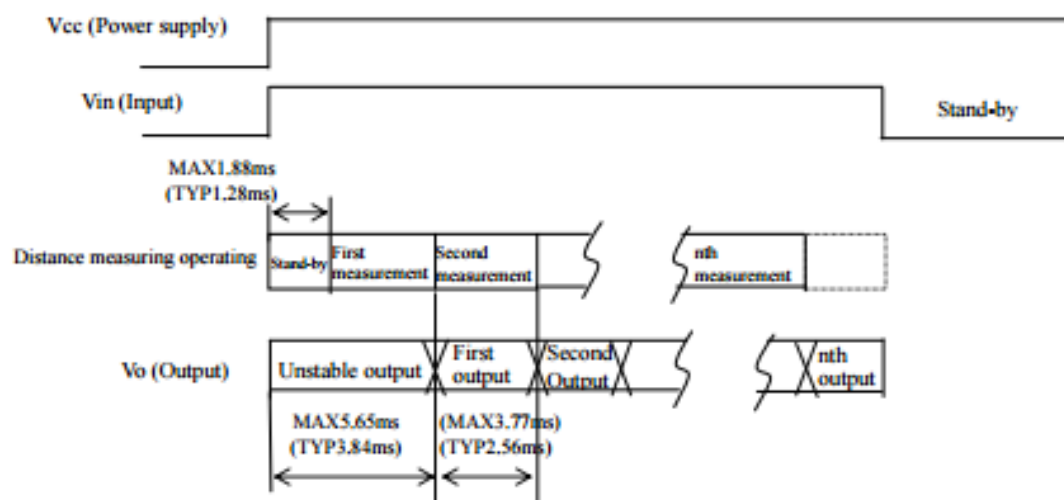
(\*)2 Output switching has a hysteresis width.

The distance specified by Vo should be the one with which the output H switches to the output L.

(\*)3 Icc1 : (LED Emitting time:TYP20μs\*8times) Icc2 : (Emitting time:TYP20μs\*15times)

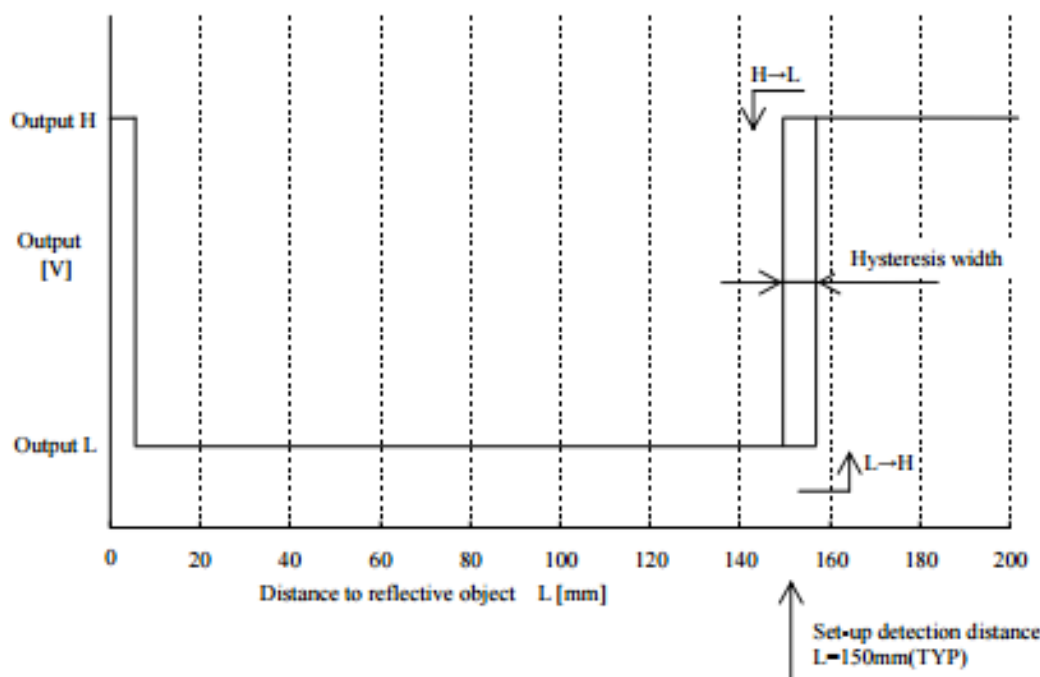
LED Pulse Current : TYP 70mA

## ■Timing chart



## ■Supplements

### ●GP2Y0D815Z0F Example of Output distance characteristics



### ●This product shall not contain the following materials.

Also, the following materials shall not be used in the production process for this product.

Materials for ODS : CFC<sub>8</sub>, Halon, Carbon tetrachloride 1,1,1-Trichloroethane (Methyl chloroform)

### ●This manufacture does not contain the chemical materials regulated by RoHS directive. (except for the parts NOT regulated by RoHS)

### ●Product mass : Approx. 0.7g

### ●Compliance with each regulation

#### 1) The RoHS directive(2002/95/EC)

This product complies with the RoHS directive(2002/95/EC).

Object substances: mercury, lead (except for lead in glass of electronic components), cadmium, hexavalent chromium, polybrominated biphenyls (PBB) and polybrominated diphenyl ethers (PBDE)

#### 2) Content of six substances specified in Management Methods for Control of Pollution Caused by Electronic Information Products Regulation (Chinese : 电子信息产品污染控制管理办法).

| Category                  | Toxic and hazardous substances |              |              |                                         |                                |                                       |
|---------------------------|--------------------------------|--------------|--------------|-----------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
|                           | Lead (Pb)                      | Mercury (Hg) | Cadmium (Cd) | Hexavalent chromium (Cr <sup>6+</sup> ) | Polybrominated biphenyls (PBB) | Polybrominated diphenyl ethers (PBDE) |
| Distance measuring sensor | ✓                              | ✓            | ✓            | ✓                                       | ✓                              | ✓                                     |

✓ : indicates that the content of the toxic and hazardous substance in all the homogeneous materials of the part is below the concentration limit requirement as described in SJ/T 11363-2006 standard.

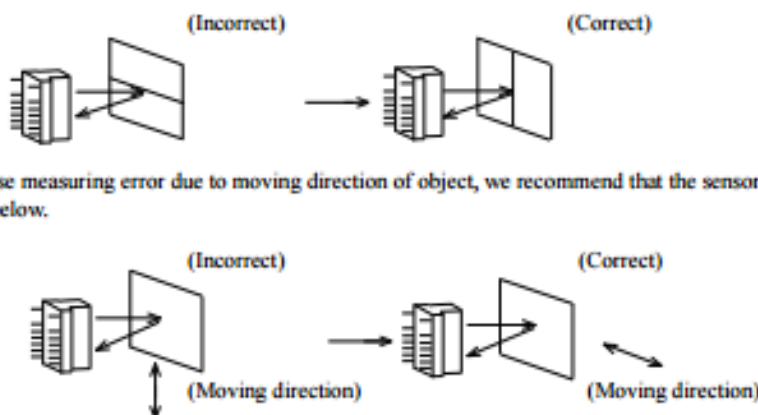
## ■Notes

### ●Advice for the optics

- Lens of this device shall be kept cleanly. There are cases that dust, water or oil and so on deteriorate the characteristics of this device. Please consider it at actual application.
- In case that protection is set in front of the emitter and detector portion, the protection cover which has the most efficient transmittance at the emitting wavelength range of LED for this product ( $\lambda=870\text{nm}\pm 50\text{nm}$ ), shall be recommended to use. The face and back of protection cover should be mirror polishing. Also, as there are cases that the characteristics may not be satisfied with according to the distance between the protection cover and this product or the thickness of the protection cover, please use this product after confirming the operation sufficiently in actual application.

### ●Advice for the characteristics

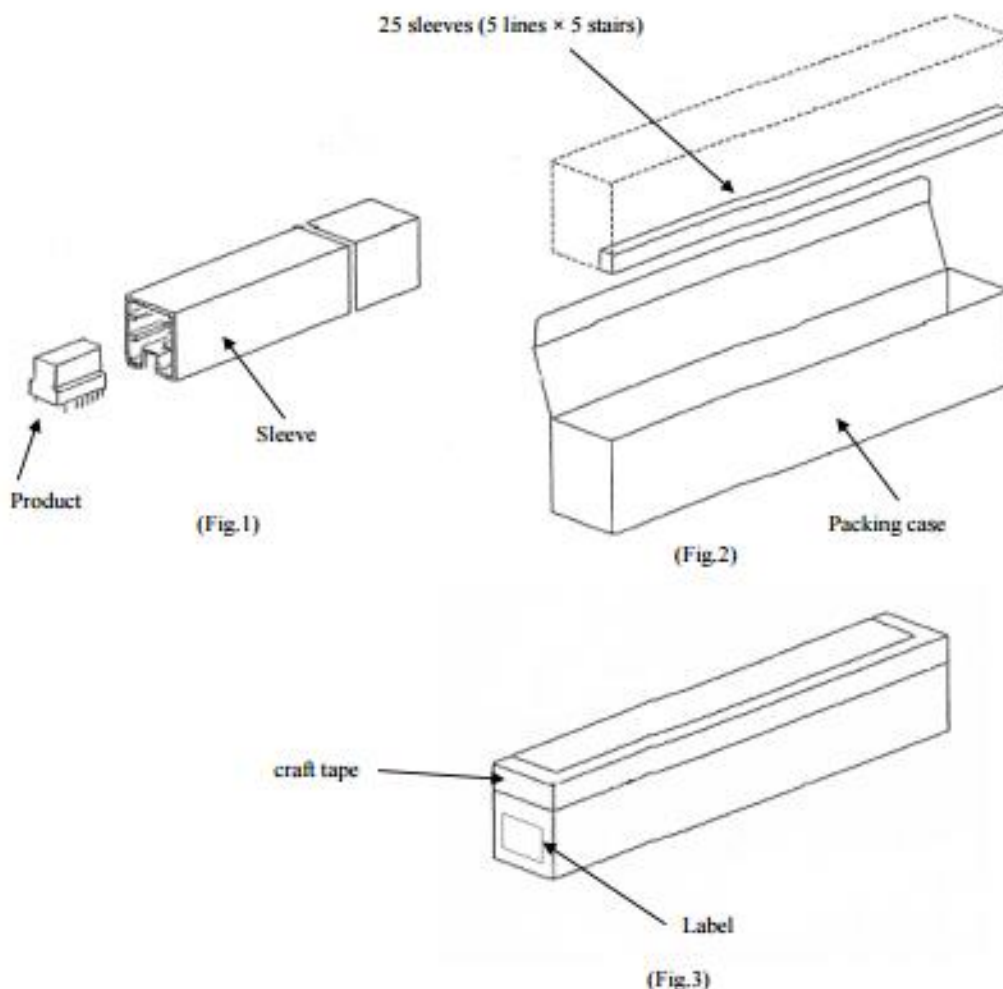
- In case that there is an object near to light exits of the sensor between the sensor and the detected object, please use this device after confirming sufficiently whether the characteristics of this sensor do not change by the object.
- When the detector surface receive direct light from the sun, tungsten lamp and so on, there are cases that the distance can not be measured exactly. Please consider the design that the detector does not receive direct light from such light source.
- Distance between sensor and mirror reflector can not sometimes measure exactly.  
By changing the mounting angle of this product, it may measure the distance exactly.
- In case that reflective object has boundary line clearly, there is cases that distance can not measure exactly.  
At that time, if direction of boundary line and the line between emitter center and detector center are parallels, it is possible to decrease deviation of measuring distance.



### ●Notes on handling

- Please don't do washing. Washing may deteriorate the characteristics of optical system and so on. Please confirm resistance to chemicals under the actual usage since this product has not been designed against washing.
- Soldering shall be done with a soldering iron and below 260°C, less than 5s and maximum 2 times. Also, please pay attention not to put out force on lead terminals while soldering. Please do not apply flow soldering because it may damage optical lens of the device.

## ■ Packing specification



### ● Packing method

1. Products of appointed quantity shall be packaged in a sleeve and both of sleeve edge shall be fixed by stopper. MAX. 40 pieces per sleeve. (Fig.1)  
The above figure shows the method of storing the product.
2. 25 sleeves shall be packaged in a packing case. (Fig.2)
3. Fix the packing case by craft tape (Fig. 3)  
(Quantity per a packing case : 1000pcs.) Outside : 607×64×77 (mm)
4. Indication items  
The contents of the carton indication conforms to EIAJ C-3 and the following items are indicated.  
Model No., Internal production control name, Quantity, Packing date, Corporate name, Country of origin

## ■Important Notices

The circuit application examples in this publication are provided to explain representative applications of SHARP devices and are not intended to guarantee any circuit design or license any intellectual property rights. SHARP takes no responsibility for any problems related to any intellectual property right of a third party resulting from the use of SHARP's devices.

Contact SHARP in order to obtain the latest device specification sheets before using any SHARP device. SHARP reserves the right to make changes in the specifications, characteristics, data, materials, structure, and other contents described herein at any time without notice in order to improve design or reliability. Manufacturing locations are also subject to change without notice.

Observe the following points when using any devices in this publication. SHARP takes no responsibility for damage caused by improper use of the devices which does not meet the conditions and absolute maximum ratings to be used specified in the relevant specification sheet nor meet the following conditions:

(i) The devices in this publication are designed for use in general electronic equipment designs such as:

- Personal computers
- Office automation equipment
- Telecommunication equipment [terminal]
- Test and measurement equipment
- Industrial control
- Audio visual equipment
- Consumer electronics

(ii) Measures such as fail-safe function and redundant design should be taken to ensure reliability and safety when SHARP devices are used for or in connection

with equipment that requires higher reliability such as:

- Transportation control and safety equipment (i.e., aircraft, trains, automobiles, etc.)
- Traffic signals
- Gas leakage sensor breakers
- Alarm equipment
- Various safety devices, etc.

(iii) SHARP devices shall not be used for or in connection with equipment that requires an extremely high level of reliability and safety such as:

- Space applications
- Telecommunication equipment [trunk lines]
- Nuclear power control equipment
- Medical and other life support equipment (e.g., scuba).

If the SHARP devices listed in this publication fall within the scope of strategic products described in the Foreign Exchange and Foreign Trade Law of Japan, it is necessary to obtain approval to export such SHARP devices.

This publication is the proprietary product of SHARP and is copyrighted, with all rights reserved. Under the copyright laws, no part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, for any purpose, in whole or in part, without the express written permission of SHARP. Express written permission is also required before any use of this publication may be made by a third party.

Contact and consult with a SHARP representative if there are any questions about the contents of this publication.